

Ecole Normale Supérieure de Lyon
Ecole Doctorale 483

INFORMATION SPATIALE, TERRITOIRES ET ENVIRONNEMENT

Télédétection spatiale et systèmes d'information
géographiques appliqués aux pays du Sud

Mémoire sur travaux, en vue de l'obtention
de l'Habilitation à Diriger des Recherches

CV et publications

Jacques IMBERNON

*Jury : Arnould Paul, Bret Bernard, Joliveau Thierry, Golay Francois,
Kerr Yann, Tonneau Jean-Philippe*

TABLE DES MATIERES

1	<i>CURRICULUM VITAE</i>	3
1.1	Cursus professionnel	3
1.2	Liste des publications dans des revues à comités de lecture	5
1.3	Contribution à des ouvrages	8
1.4	Thèse	8
1.5	Communications	9
1.6	Rapports	10
1.7	Brevets et distinction	12
1.8	Ouvrages, multimédia, sites web	12
1.9	Liste des mémoires et diplômes dirigés	13
1.10	Participation à des modules d'enseignement	15
1.11	Autres activités liées à la recherche	15
2	<i>SELECTION DE PUBLICATIONS ET VALORISATION</i>	17
2.1.	Télédétection spatiale, bilan hydrique et production agricole	17
2.1.1	Bilan hydrique et infrarouge thermique	17
2.1.2	Indices de végétation et bilan hydrique des cultures	35
2.1.3	Indices de végétation et production agricole	43
2.1.4	Pixels mixtes et réponses spectrales	49
2.2	Processus de déforestation et écologie du paysage	71
2.2.1	Dynamiques de déforestation en Amazonie	71
2.2.2	Déforestation et pression démographique en Amazonie	77
2.2.3	Analyse quantitative de motifs de paysages de déforestation	88
2.3	Cartographie participative et évaluation d'impact au niveau local	101
2.3.1	Cartographie participative et à très haute résolution satellitale	101
2.3.2	Apport d'une image à très haute résolution dans l'évaluation de l'impact environnemental de populations réfugiées	116
2.4	Communication et valorisation	124
2.4.1	Cédéroms	124
2.4.2	Sites web	126
2.4.3	Brevet	129

1 CURRICULUM VITAE

1.1 *Cursus professionnel*

Nationalité	Française
Date de naissance	26 juillet 1955
Situation familiale	Marié. 4 enfants.
Adresse professionnelle	ENS-Lyon 15 Parvis René Descartes 69342 Lyon cedex 7 Tél : +33 4 37 37 63 48 Secr. : +33 4 67 59 38 87 Email : jacques.imbernon@ens-lsh.fr
Fonction	Chef de projets de recherche, chercheur
Compétences thématiques	Gestion des ressources naturelles , Aménagement du territoire, Systèmes d'Information, Télédétection Spatiale.
Région(s) d'expérience	Ceinture tropicale humide (Afrique, Amérique centrale et du sud et Asie) et Sahel
Formation	Mécanique des fluides (doctorat), Institut de mécanique / Grenoble / France (1981) Hydrologie mathématique (ingéniorat), Institut des sciences de l'ingénieur (ISIM) / Montpellier / France (1978)
Compétences linguistiques	Langue maternelle : Français Langue de travail : Anglais (lu, parlé, écrit), Espagnol (lu, parlé, écrit)
Expérience professionnelle	Depuis septembre 2007: ENS-Lyon . Chercheur associé à l'ENS-Lyon, mis à disposition par le CIRAD. Coordinateur du projet européen SINREM du 6eme PCRDT en Amérique Centrale. Coordinateur d'un WP du projet européen LUPIS du 6eme PCRDT (Europe, Chine, Inde, Brésil, Afrique de l'Ouest et du Nord). Co-leader d'une ATP CIRAD « Observatoire des Agricultures du Monde ». 2005 - aout 2007: CIRAD-Tera . Coordinateur du projet européen SINREM du 6eme PCRDT en Amérique

Centrale. Coordinateur d'un WP du projet européen LUPIS du 6eme PCRDT (Europe, Chine, Inde, Brésil, Afrique de l'Ouest et du Nord). Leader d'un contrat d'expertise pour le projet PRODESIS de la Commission Européenne dans le cadre d'un consortium IICA-CIRAD-CATIE au Mexique.

2002-2004: **Ministère de l'Environnement et des Ressources Naturelles (MARN)**, San Salvador, El Salvador. Coordinateur du projet régional Sherpa (Guatemala, El Salvador, Honduras) avec IGN France, sur financement du MRT

2000-2002: **CIRAD-Tera**, Montpellier (France). Ingénieur de recherches. Télédétection, Systèmes d'information, Analyse spatiale, gestion des Ressources Naturelles, Développement Territorial. Coordinateur d'un projet de l'UNHCR.

2000: **International Institut for Applied Science Analysis (IIASA)**, Vienne, Autriche. Chercheur visitant (année sabbatique)

1998-2000: **CIRAD-Tera**, Montpellier (France). Ingénieur de recherches. Télédétection, Systèmes d'information, Analyse spatiale, gestion des Ressources Naturelles, Développement Territorial.

1994-1997: **International Center for Research in Agroforestry (ICRAF)**, Nairobi (Kénya). Partenaire du projet éco-régional « Alternatives to Slash and Burn » (ASB) du GEF.

1991-1994: **CIRAD-Ca**, Montpellier (France). Ingénieur d'études en télédétection spatiale et SIG. Responsable de la " mission télédétection " à la Direction Scientifique du CIRAD.

1986-1993: **CIRAD-Irat**, Montpellier (France). Ingénieur d'études. Chargé des recherches en télédétection spatiale.

1984-1985: **Société des Aménagements des vallées des Volta (AVV)**, Burkina Faso. Ingénieur d'études. Responsable de la conception et de la réalisation des aménagements hydro agricoles.

1981-1983: **IRAT**, Montpellier (France). Ingénieur d'études. Responsable des mesures de flux atmosphériques et dans le sol.

**Expertises
internationales**

1998 à 2007: expertises pour **WWF** (Brésil), **HCR** (Guinée, Suisse), **ICRAF** (Kenya), **IGBP** (Suède), **BM** (Tunisie), **FAO** (Haïti, Madagascar), **Ministère de la Recherche** (Colombie, Honduras, Guatemala, Nicaragua), **UE** (Mexique, Guatemala, Salvador, Honduras)

1992 à 1997 : expertises **UE** (Italie, Belgique), **FFEM** (Brésil, Etats-Unis, Pérou, Indonésie), **FAC** (Madagascar, Cameroun), **ICRAF** (Ouganda), **BM** (U.S.A.), **EOS-NASA** (U.S.A.), **CIRAD** (Singapour, Thaïlande, Indonésie, Philippines)

**Distinctions
scientifiques**

1991 : Lauréat du **prix Brochet-Gerbier de l'OMM**, Genève (Suisse).

Membre de l'American Association for the Advancement of Science.

1.2 Liste des publications dans des revues à comités de lecture

Imbernon J., 2008. Des populations réfugiées frontalières et leurs impacts, l'exemple de la Guinée forestière. *Géoconfluences*. [On line]. <Url : <http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/typespace/frontier/FrontDoc3.htm>

Imbernon J., Balaÿ C., 2008. L'eau "bien public régional" dans un territoire transfrontalier d'Amérique centrale. *Géoconfluences*. [On line]. <Url : <http://geoconfluences.ens-lsh.fr/doc/typespace/frontier/FrontScient3.htm>>

Imbernon J., J. L. Villacorta Monzon, C. L. Zelaya Flores, A. A. Valle Aguirre, 2005. Fragmentacion y conectividad del bosque en El Salvador. Aplicación al Corredor Biologico Mesoamericano. *Bois et Forêts des Tropiques*, n° 286 (4) : 15-28.

Imbernon J., 2003. Image Ikonos et étude environnementale : le camp de réfugiés du Hcr en Guinée forestière. *Bois et forêts des tropiques*, n° 275/1 : 17-28.

Imbernon J., 2002. Apports d'une image satellitaire à très haute résolution dans l'identification des composantes d'un paysage. Application à un paysage agricole de Guinée forestière. *Bois et forêts des tropiques*, décembre 2002. ??????

Imbernon J., 2002. Cartographie participative à très haute résolution. Utilisation d'une image Ikonos dans un projet de développement communal en Haïti. *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 12 n° 1, p. 115-128. Version disponible sur Internet : [<http://dx.doi.org/10.3166/rig.12.115-128>]

Lambin E.F., Turner II B.L., Geist H., Agbola S., Angelsen A., Bruce J.W., Coomes O., Dirzo R., Fischer G., Folke C., George P.S., Homewood K., **Imbernon J.**, Leemans R., Li X., Moran E.F. Mortimore M., Ramakrishnan P.S., Richards J.F., Skånes H., Steffen W., Stone G.D., Svedin U., Veldkamp T., Vogel C., Xu J., 2001. Our Emerging Understanding of the Causes of Land-Use and -Cover Change. *Global Environmental Change*. no. 2001/4 : 261-269

Imbernon J., Branthomme A., 2001. Characterization of landscape patterns of deforestation in tropical rain forests. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, no 9.

Imbernon J., 2000. Déforestation et pression démographique au Rondonia, Brésil. *Bois et Forêts des Tropiques*, (266) : 23-33

Imbernon J., 1999. Changes in tropical practice and landscape over a 60-year period in North Lampung. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 76 : 67-73

Imbernon J., 1999. Pattern and development of land-use changes in the Kenyan highlands since the 1950s. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 76 : 61-66

Imbernon J., 1999. A comparison of the driving forces behind deforestation in the Peruvian and the Brazilian Amazon. *Ambio*, vol. XXVIII, no 6 : 509-513

Imbernon J., 1999. Approche écorégionale et approche spatiale. *Les cahiers de la recherche développement*, no 45 : 106-113

Imbernon J., 1999. Paysages et dynamiques de déforestation en amazonie péruvienne. *Bois et Forêts des Tropiques*, (259) : 45-58

Ouaidrari H., Bégué A., **Imbernon J.**, D'Herbès J.M. 1996. Extraction of the pure spectral response of the landscape components in NOAA-AVHRR mixed pixels. Application to the HAPEX-Sahel degree square. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (12) : 2259-2280

Ouaidrari H., **Imbernon J.**, Dedieu G., 1994. Use of a meteorology model to correct atmospheric effects in NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 15 (11) : 2257-2271

Kakane V.C.K., **Imbernon J.**, 1992. Estimation of rainfall in Senegal using the satellite NOAA-9/AVHRR. *International Journal of Remote Sensing*, 13 (11) : 2059-2068

Kerr Y.H., Lagouarde J.P., **Imbernon J.**, 1992. Accurate land surface temperature retrieval from AVHRR data with use of an improved split Window Algorithm. *Remote Sensing of Environment*, 41 : 197-209

Lagouarde J.P., Brunet Y., Kerr Y., **Imbernon J.**, 1991. Estimating the daily upward longwave radiation from NOAA-AVHRR data for mapping net radiation. *Advances in space research*, 11 (3) : 151-117

Imbernon J., Kerr Y., 1989. Suivi et évaluation des productions agricoles à l'aide des données NOAA AVHRR : Sénégal 1987. *Agronomie Tropicale*, 44 (4) : 327-332

Kerr Y.H., **Imbernon J.**, Dedieu G., Hautecoeur O., Lagouarde J.P., Seguin B., 1989. NOAA AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 10 (4-5) : 847-854

Seguin B., Assad E., Fréteaud J.P., **Imbernon J.**, Kerr Y.H., Lagouarde J.P., 1989. Use of meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian regions. *International Journal of Remote Sensing*, 10 (6) : 1101-1117

Cortier B., Pochtier G., **Imbernon J.**, 1988. Le maïs au Sénégal : effet des techniques culturales et des conditions hydriques en culture pluviale. *Agronomie Tropicale*, 43 (2) : 85-90

Nègre T., **Imbernon J.**, Guinot J.P., Seguin B., Bergès J.C., Guillot B., 1988. Estimation et suivi de la pluviométrie au Sénégal par satellite Météosat. *Agronomie Tropicale*, 43 (4) : 279-288

Poss R., Saragoni H., **Imbernon J.**, 1988. Bilan hydrique simulé du maïs au Togo méridional. *Agronomie Tropicale*, 43 (1) : 18-29

Imbernon J., Assad E., Guillot B., Sagorne D., 1987. Evaluation de la pluviométrie par cumul des images infrarouge thermique METEOSAT (Sénégal) 1986. *Veille Climatique Satellitaire*. n 16 : 49-57

Nègre T., **Imbernon J.**, Guinot J.P., Carn M., 1987. Estimation de la pluviométrie au Sénégal en 1984, 1985, 1986 par cumul des synthèses thermiques METEOSAT. *Veille Climatique Satellitaire*, (20) : 62-69

Kalms J.M., **Imbernon J.**, 1983. Modalités d'alimentation en eau du riz pluvial : bilan des recherches méthodologiques effectuées à Bouaké en Côte d'Ivoire. *Agronomie Tropicale*, 38 (3) : 198-205

Vauclin M., **Imbernon J.**, Vachaud G., 1983. Analyse comparative des différentes méthodes de détermination de la conductivité hydraulique des sols non saturés de la zone centre-nord du Sénégal. *Agronomie Tropicale*, 38 (3) : 186-197

1.3 Contribution à des ouvrages

Boucher F., Reyes Gonzalez J.A., Rivas G.G., **Imbernon J.**, Alviar Nieto M.L., 2010. Estrategia, capacidades y herramientas para el desarrollo: experiencia en las selva Lacandona, México. IICA, San José. p. 55.

Leakey, R.R.B., Kranjac-Berisavljevic, G., Caron, P., Craufurd, P., Martin, A., McDonald, A., Abedini, W., Afiff, S., Bakurin, N., Bass, S., Hilbeck, A., Jansen, T., Lhaloui, S., Lock, K., Newman, J., Primavesi, O., Sengooba, T., Ahmed, M., Ainsworth, L., Ali, M., Antona, M., Avato, P., Barker, D., Bazile, D., Bosc, P-M., Bricas, N., Burnod, P., Cohen, J., Coudel, E., Dulcire, M., Dugué, P., Faysse, N., Farolfi, S., Faure, G., Goli, T., Grzywacz, D., Hocdé, H., **Imbernon, J.**, Ishii-Eiteman, M., Leakey, A., Leakey, C., Lowe, A., Marr, A., Maxted, N., Mears, A., Molden, D., Muller, J.P., Padgham, J., Perret, S., Place, F., Reid, R., Riches, C., Scherr, S., Sibelet, N., Simm, G., Temple, L., Tonneau, J.P., Trebuil, G., Twomlow, S., Voituriez, T., Wack, A.L., Abate, T. and Butler, L.M., 2008. Évaluation internationale des connaissances, des sciences et des technologies agricoles pour le développement (IAASTD). Intergovernmental Plenary Session in Johannesburg, South Africa, April 2008.

Imbernon J., 2004. Spatial approach to deforestation phenomena: what remote sensing can contribute. In: *Beyond Tropical Deforestation. From Tropical Deforestation to Forest Cover Dynamics and Forest Development*. UNESCO-CIRAD, UNESCO, Paris, p. 13-22.

Chaussonot N., **Imbernon J.**, Despinoy M., 2003. Design and development of information system in HVIP. In *Promotion of participatory irrigation management in Hadejia Valley Irrigation Project, Nigeria : experiences on approaches, lessons and prospects. Synthesis book*, Abubakar S.Z., Kuper M. (eds). - Samaru : Ahmadu Bello University, p. 168-177

Kerr Y., **Imbernon J.**, Lagouarde J.P., Seguin B., 1990. Evaluation par télédétection de l'évapotranspiration à l'échelle climatique. In *Influence à l'échelle régionale des couvertures pédologiques et végétales sur les bilans hydriques et minéraux des sols. Action thématique programmée, rapport final, juin 1986 - juin 1989*, Vachaud G. (ed.). - Grenoble : Institut de Mécanique, p. 419-437

1.4 Thèse

Imbernon J., 1981. Variabilité spatiale des caractéristiques hydrodynamiques d'un sol du Sénégal. Application au calcul d'un bilan sous culture. Grenoble, Institut de

1.5 Communications

Evangelista-Méndez R.E., Mejia-Figueroa K.L., Alvarado-Dimas D.J., **Imbernon J.**, Gil S.L., Hernandez M.A., 2005. Identification de territorios de café (*Coffea arabica*) de calidad en El Salvador. In *La caficultura sostenible, un desafío impostergable. XXI Simposio Latinoamericano de caficultura, 14 y 15 de julio de 2005, San Salvador - Tegucigalpa : IICA-PROMECAFE*, p. 10-21 [Cd-Rom]

Bégué A., Guillobez S., **Imbernon J.**, Beaudoin A., Kerr Y., 1997. Characterization of the land use/cover in the Congo rainforest with optical and microwave data. In *3, ERS Symposium on Space at the Service of our Environment, Florence, Italie, 17-21/03/1997. - Montpellier : CIRAD-CA*, 4 p.

Bégué A., Zanardo C., **Imbernon J.**, Deshayes M., 1997. Monitoring tropical deforestation processing high frequency and high resolution satellite data. In *Earth surface remote sensing, Cecchi G., Engman E.T., Zilioli E., Earth Surface Remote Sensing, London, Royaume-Uni, 21-25/09/1997. - Bellingham : SPIE (SPIE Proceedings)*, p. 261-272

Imbernon J., 1994. Introduction à la télédétection et à la gestion des espaces ruraux. In *Analyse de la diversité des situations agricoles. Conséquences sur la programmation de la recherche. Projet Garoua 2, Atelier d'échanges et de formation, Garoua, Cameroun, 22-28/10/1993. - Montpellier : CIRAD-CA*, p. 73-74

Imbernon J., Nounamo L., Faure G., 1994. Conclusions sur l'outil télédétection. In *Analyse de la diversité des situations agricoles. Conséquences sur la programmation de la recherche. Projet Garoua 2, Atelier d'échanges et de formation, Garoua, Cameroun, 22-28/10/1993. - Montpellier : CIRAD-CA*, p. 75-77

Maraux F., Baron C., Forest F., **Imbernon J.**, Ouaidrari H., 1994. Prévisions de rendement du mil en Afrique sahélienne : l'expérience du CIRAD. In *Methodes de prévision de rendements agricoles, Villefranche-sur-Mer, France, 24-27/10/1994, CE, FAO. - Montpellier : CIRAD-CA*, p. 309-314

Bégué A., **Imbernon J.**, Desprat J.F., 1991. Estimation de la production primaire en zone sahélienne à partir de données radiométriques. In *International Colloquium Physical Measurements and Signatures in Remote Sensing. 5, Courchevel, France, 14-18/01/1991. - Paris : ESA*, 4 p.

Imbernon J., 1990. Agroclimatologie régionale. In *Agronomie et ressources naturelles en régions tropicales, Journées de la DRN CIRAD/IRAT/MICAM, 1, Montpellier, France, 12-15/09/1989. - Montpellier : CIRAD-IRAT*, p. 113-121

Kalms J.M., **Imbernon J.**, 1984. Patterns of water supply in upland rice in Bouake, Ivory Coast. In *An overview of upland rice research. Proceedings of the 1982, Bouaké, Ivory Coast, upland rice workshop, Bouaké, Côte d'Ivoire, 1982.* - Los Banos : IRRI, p. 185-195

Kalms J.M., **Imbernon J.**, 1981. Modalités d'alimentation en eau du riz pluvial. Bilan des recherches méthodologiques effectuées à Bouaké en Côte d'Ivoire. In *Upland Rice Workshop and Monitoring Tour, Bouaké, Côte d'Ivoire, 04-08/10/1982.* - Bouaké : IDESSA, 19 p.

1.6 Rapports

Imbernon J., 2009. Final activity report of 6th EU-PCRDT project: Synchronising Information for Local-National Participatory Natural Resources Management (SINREM). CIRAD Montpellier, France. pp. 27 + 16 annexes (deliverables).

Imbernon J., 2007. Desarrollo de cartografía regional sobre potenciales para proveer servicios ambientales en la selva, así como sistemas de información geográficos para organizaciones de productores de café orgánico. Rapport de consultance pour EuropeAid/122940. pp. 115.

Imbernon J., 2004. Contribution au développement durable et à l'adaptation aux changements climatiques en Amérique Centrale. Rapport pour le Ministère de la Recherche, Paris (France). pp. 52.

Imbernon J., 2004. Environmental Assessment and monitoring methods for refugee - hosting areas. End of project report. UN Refugee Agency - UNHCR, Geneva, Switzerland. Pp XXX

Konomou M.F., **Imbernon J.**, Zoumanigui K., Morant P., Camara A.A. 2002. Occupation des sols en Guinée forestière [Poster]. Montpellier, CIRAD, 2 p.

Imbernon J., 1997. A comparison of the driving forces behind deforestation in the Peruvian and the Brazilian Amazon. Nairobi, ICRAF, 11 p. (ASB Technical Report, n. 2)

Imbernon J., 1997. From shifting cultivation to shifted cultivators : 60 years of landscape change in North Lampung, Sumatra. Nairobi, ICRAF, 7 p. (ASB Technical Report, n. 1)

Imbernon J., 1997. Is there deforestation by slash and burn agriculture in South Cameroon ?. Nairobi, ICRAF, 9 p. (ASB Technical Report)

Imbernon J., 1997. Population growth and deforestation : the case of Rondonia in the Brazilian Amazon. Nairobi, ICRAF, 10 p. (ASB Technical Report, n. 3)

Imbernon J. 1997. Properties, changes and links of land uses in the Kenyan highlands : upper and lower Embu zones. Nairobi, African Highland Initiative, 14 p. (AHI Technical Report Series, n. 7)

Imbernon J. 1996. Eyes in the skies : visions of landscapes and vegetation changes. Nairobi, CIRAD-CA, 129 p.

Imbernon J., Izac A.M., Bégué A., 1996. Scaling and integration of high frequency and high resolution data : characterization of the slash-and-burn tropical deforestation process. Nairobi, ICRAF, 16 p.

Imbernon J., Clopes A., 1991. Connaissance du milieu physique des périmètres du Bras de Cilaos et du Bras de la Plaine à l'Ile de la Réunion. 2 Synthèse cartographique, esquisse d'un système d'information géographique. Montpellier, CIRAD-IRAT, 45 p.

Imbernon J., Lagouarde J.P., Kerr Y., Bégué A. 1990. Suivi agroclimatique des cultures en zone sahélienne à partir des données NOAA de Mas-Palomas. Rapport 2eme phase. Document provisoire. Montpellier, CIRAD-IRAT, 161 p.

Imbernon J., 1988. Suivi agroclimatique des cultures en zone sahélienne à partir des données NOAA de Mas Palomas : rapport annuel, septembre 1988. Montpellier, CIRAD-IRAT, 98 p.

Imbernon J., Leprieur C., 1988. Etude de faisabilité " Caractérisation des surfaces cultivées (zone soudano-sahélienne) à l'aide de l'imagerie SPOT. Etude d'exploitations caractérisées par des parcellaires hétérogènes de faible dimension ". Toulouse, LERTS, 30 p.

Imbernon J., Leprieur C., Garin P., 1988. Etude de faisabilité : caractérisation des surfaces cultivées (zone Soudano-Sahélienne) à l'aide de l'imagerie SPOT ; Etude d'exploitations caractérisées par des parcellaires hétérogènes de faible dimension. Toulouse, LERTS, 30 p.

Baron C., **Imbernon J.** 1987. Cartographie assistée par ordinateur : présentation des logiciels UNIRAS, exemples d'applications. Montpellier, CIRAD-IRAT, 12 p.

Forest F., **Imbernon J.** 1987. Evaluation et suivi de la production agricole en fonction du climat et de l'environnement ESPACE. Campagne agricole au 10 Août Mali/Sénégal. Montpellier, CIRAD-IRAT, 46 p.

Imbernon J., Baron C., 1987. Le krigeage : une méthode d'analyse géostatistique. Exemple d'applications en agroclimatologie. Montpellier, CIRAD-IRAT, 16 p.

Imbernon J., Naringar N., 1987. Etude agroclimatique première phase de la double culture maïs-coton dans la région de Notse au Togo. Montpellier, CIRAD-IRAT, 19 p.

Tonneau J.P., **Imbernon J.**, 1986. Projet Fara-Poura. Première phase 1984-1985. Présentation des résultats. Montpellier, CIRAD-IRAT, 113 p.

Cissé L., **Imbernon J.**, Dancette C., 1985. Bilan hydrique et minéral sous culture d'arachide et de mil à l'échelle de l'hectare. Dakar, ISRA, 24 p. (Document de Travail/ISRA, n. 5)

Imbernon J., 1985. Etude du ruissellement et de l'érosion sur parcelle et bassin versant. Résultats d'expérimentation de l'hivernage 1984. Montpellier, CIRAD-IRAT, 43 p.

Imbernon J., 1983. Projet de pompage et d'irrigation à l'aide de l'énergie éolienne : région de Louga au Sénégal. S.l., s.n., 20 p.

Imbernon J., Arnaud M., Bourgeon G., Brouwers M., Fortier M., Fréteaud J.P., Koffi Koffi D., 1983. Bilan hydrique et énergétique à l'échelle d'une parcelle. Compte-rendu de fin d'étude ATP-Eau INRA. Montpellier, GERDAT-IRAT, 41 p.

Fréteaud J.P., **Imbernon J.**, Charoy J., 1982. Conduite d'une irrigation à l'aide de l'humidimètre à neutrons. Projet hydroagricole du Sarir (Libye). Montpellier, GERDAT-IRAT, 14 p.

1.7 Brevets et distinction

Logiciel ADOC de reconnaissance automatique d'objet sur des images satellitaires à très haute résolution. Brevet enregistré en 2002.

Lauréat du prix Brochet-Gerbier de l'OMM (Organisation Mondiale de la Météorologie) décerné à l'Organisation des Nations Unies à Genève (Suisse) en 1991.

1.8 Ouvrages, multimédia, sites web

Imbernon J., Chazalette M.F., 2007. "Synchronizing Information for Natural Resources Management". Web des savoirs. Montpellier. CIRAD. [On line]. <Url : <http://inco-sinrem.cirad.fr/>>

Imbernon J., 2005 "Atlas de Agricultura y Bosque". 2005. MARN, San Salvador, El Salvador. [Cd-Rom]

Imbernon J., 2005. "Atlas de Agricultura y Bosque". MARN, El Salvador. [On line]. <Url : <http://www.marn.gob.sv/>>

Imbernon J., 2005. Atlas de agricultura y bosque en El Salvador. MARN - El Salvador. CIRAD, Montpellier, France. pp 34.

Imbernon J. (ed.), Guis R. (dir.), 2002. Environnement et populations réfugiées : site scientifique du Web des savoirs. Montpellier, CIRAD. [On line] < Url : <http://guinee-hcr.cirad.fr/> >

Imbernon J., Schneider J., 1999. La déforestation vue par les satellites. Projet de recherche Cirad-Icraf : l'agriculture sur brûlis en région tropicale humide. Montpellier, CIRAD-TERA [Cd-Rom]

1.9 Liste des mémoires et diplômes dirigés

Nègre T., 1987. Estimation et suivi de la pluviométrie au Sénégal par utilisation du canal infrarouge thermique du satellite Météosat. Mémoire Fin d'études en Sciences du sol et bioclimatologie, Paris, INAPG. 70 p.

Kakane, V.C.K., 1990. Estimation of rainfall in Senegal using the satellite NOAA-9/AVHRR. Mémoire de stage au GDTA. 35 p.

Bégué A., 1991. Estimation de la production primaire en zone sahélienne à partir de données radiométriques : cas d'un couvert discontinu, le mil. Thèse de Doctorat en Sciences, Université de paris VII. 139 p.

Ouaidrari, H., 1994. Utilisation des données NOAA-AVMRR pour modéliser la production primaire du mil dans l'écosystème sahélien (Niger). Thèse de Doctorat en Sciences. Université de Paris VII-UFR de physique, France. 210 p.

Branthomme A., 1997. Caractérisation quantitative des paysages forestiers tropicaux : application à l'analyse de la déforestation par l'agriculture-sur-brûlis. Mémoire de fin d'étude, Engref, Nancy, (France). 215 p.

Lesne F., 2001. Cartographie régionale du couvert végétal en Guinée forestière à partir de données Landsat 7. Mémoire de master, Université d'Orléans. 17 p. + annexes.

Archambault N., 2001. Conception et développement d'un système d'information à l'échelle globale. Mémoire de DEA en Sciences de l'Information Géographique. Université de Marne-la -Vallée, Ecole Nationale des Sciences Géographiques. 75 p.

Valle Aguirre A.A., Villacorta Monzon J.L., Zelaya Flores C.L., 2003. Estudio de fragmentación del bosque del río Lempa y sus implicaciones en el Corredor

Biológico Mesoamericano: el case de El Salvador. Memoria de graduación de Ingeniero Agrónomo, Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, El Salvador. 105 p.

Paniagua Cienfuegos M.R., 2003. Estudio piloto de cartografía de cobertura y uso de suelo de alta resolución. Memoria de graduación de Ingeniero Agrónomo, Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, El Salvador. 59 p.

Alvarado Dimas D.J., Evangelista Mendez R.E., Mejia Figueroa K.L., 2004. Identificación de territorios de café de calidad en El Salvador". Memoria de graduación de Ingeniero Agrónomo, Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, El Salvador. 89 p.

Ceron Montoya G.A., 2004. Caracterización espacial de la disponibilidad, uso y contaminación industrial del recurso hídrico de la subcuenca del Río Acelhuate. Memoria de graduación de Ingeniero Agrónomo, Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, El Salvador. 104 p.

Rauda Claros M.J., 2004. Analisis geografico de la autosuficiencia alimentaria en El Salvador. Memoria de graduación de Ingeniero Agrónomo, Universidad de El Salvador, Facultad de Ciencias Agronómicas, El Salvador. 84 p.

Balaý C., 2007. Gestión del agua y mancomunidades en la Cuenca Alta del Río Lempa Región Trifinio, Guatemala, Honduras, El Salvador. Mémoire de stage, AgroParisTech, Paris. 54 p.

Meneses Villanueva A., 2007. Développement d'un système d'information géographique pour la gestion des ressources naturelles dans une zone transfrontalière d'Amérique Centrale. Mémoire de fin d'études, SupAgro Montpellier, Spécialisation en Technologies de l'information et de la Communication (Agro-TIC). 87 p.

Hamani Y., 2009. Analyse de la dynamique urbaine des espaces périphériques de la ville d'Alger. Cas de la commune de Bab Ezzouar. Mémoire de master recherche en Systèmes Territoriaux, Développement Durable et Aides à la Décision à l'Université de Savoie.

Vergnaud C., 2010. L'intégration des populations locales dans la gestion des ressources naturelles, un enjeu du développement durable pour le Parc National du Nevado de Toluca. Mémoire de master 1 en Systèmes Territoriaux, Développement Durable et Aides à la Décision à l'Ecole Normale Supérieure de Lyon.

En cours : co-direction (avec Lydia Coudroy de Lille, ENS-LSH Lyon) de la thèse de Sarah Dauvergne intitulée « Gestion des espaces intermédiaires périurbains à usage agricole dans les villes d'Afrique sub-saharienne ».

1.10 Participation à des modules d'enseignement

Impact environnemental de populations réfugiées. Cas de la Guinée forestière. Master « Systèmes territoriaux développement durable. Aide à la décision. ENS-Lyon, Université Joseph Fourier - Grenoble 1, Université de Savoie – Chambéry, Université Jean Monnet - Saint-Etienne, Ecole des Mines de Saint-Etienne, Université Lumière - Lyon 2, Université Jean Moulin - Lyon 3

Déforestation tropicale - Aspects physiques. Module "Ecologie des forêts tropicales" de l'Engref, dans le Master "Biologie, Géosciences, Agroressources et Environnement", spécialité « Fonctionnement des Ecosystèmes Naturels Et Cultivés », de l'Université Montpellier 2 et de l'Agro M. 2005.

Applications environnementales des Systèmes d'information. Master Recherche Sciences Humaines et Sociales. Mention : Géographie et aménagement Spécialité : Mondialisation et dynamiques rurales comparées, Paris X Nanterre. 2005.

Sistemas de informacion ambiental. Posgrado agronomia, Faculda de Agronomia, Universidad Nacional de El Salvador (UES), 2003-2004.

Télédétection et photo-interprétation. Module de formation pour les chercheurs de l'Institut de Recherche Agronomique de Guinée (IRAG) à Conakry (Guinée) pour le compte du Ministère français des Affaires Etrangères (MAE) : 2002

Télédétection et photo-interprétation. Module de formation pour les techniciens cartographes des Instituts Géographiques Nationaux de El Salvador, Guatemala et Honduras à San Salvador (El Salvador) pour le compte d'IGN- France International.

Dynamiques spatiales et télédétection. DEA « Mutation spatiales », Université Paul Valéry – Montpellier : 1999, 2000, 2001, 2002.

1.11 Autres activités liées à la recherche

Programmes nationaux et internationaux

- Membre du Comité Scientifique du PNTS (Programme National de Télédétection Spatiale) : 1994-1996.
- Membre du Comité d'expert du projet TREES du Centre Commun de Recherche d'Ispra : 1997.
- Membre du Comité d'expert du Programme IGBP -LUC (land Use/Cover Change) : 2000.

Edition de revues à Comité de Lecture

- International Journal of Remote Sensing : 1998 - 2006
- Revue Internationale de Géomatique : 2001-2011

Autres

- Coordonateur du projet FFEM "Environmental Assessment and monitoring methods for refugee - hosting areas" pour le compte de UNHCR : 2000-2002.
- Coordonateur du projet 6eme PCRDT (UE) "Sinrem" de 2006 à 2009.
- Coordonateur d'un Work Package (WP) "data base" dans le projet "Land Use Policies Impact and Sustainable Development" (LUPIS) du 6eme PCRDT (UE) de 2007 à 2011
- Coordonateur du projet "Sherpa" en Amérique Centrale financé par le Ministère de la recherche et de la Technologie (MRT) et le Centre d'Etudes Spatiales (CNES) dans le cadre du Réseau Terre Espace (RTE) de 2002 à 2004.
- Expert pour différentes agences nationales et internationales : Banque Mondiale, FAO, Agence Spatiale Européenne, Ministère français des Affaires Etrangères, Union Européenne (voir CV).

2 SELECTION DE PUBLICATIONS ET VALORISATION

2.1. Télédétection spatiale, bilan hydrique et production agricole

Ces travaux constituent la première partie de mon parcours de recherches. Après une thèse de doctorat sur l'hydrodynamique des sols et les bilans hydriques sous cultures, mes travaux au Cirad se sont tout d'abord déroulés dans une équipe de recherches en agro-climatologie. Deux des principales variables étudiées étaient les précipitations et l'évapotranspiration des cultures pour en estimer le bilan hydrique et prendre en compte la variabilité spatiale et temporelle dans les pays sahéliens où j'étais amené à travailler. De là est venu l'intérêt pour les données satellitales et dans un premier temps pour les données des satellites météorologiques Meteosat et Noaa qui permettaient d'estimer les bilans d'énergie à la surface de la terre. L'utilisation du capteur Avhrr de NOAA m'a amené à étendre le spectre radiométrique utilisé avec la combinaison des canaux visible et proche infrarouge pour le calcul d'indices de végétation. L'un de ces indices, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), a été particulièrement utilisé pour être mis en relation avec les productions agricoles estimées par les Services de Statistiques Agricoles. Un des problèmes majeurs rencontrés dans l'utilisation de ces données à basse résolution étaient toutefois le mélange des signaux radiométriques enregistrés sur les pixels composés de plusieurs types d'occupation des terres. Cette question des pixels mixtes a alors fait l'objet de travaux pour tenter de « déconvoluer » le signal.

2.1.1 Bilan hydrique et infrarouge thermique

Seguin B., Assad E., Freteaud J.P., Imbernon J., Kerr Y., Lagouarde J.P., 1989. Use of meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian regions. *International Journal of Remote Sensing*, Vol. 10, n° 6. pp 1101-1117.

Use of meteorological satellites for water balance monitoring in Sahelian regions

B. SEGUIN†, E. ASSAD‡, J. P. FRETEAUD‡,
J. IMBERNON‡, Y. KERR§ and J. P. LAGOÛARDE†

†Station de Bioclimatologie, Institut National Recherche Agronomique,
Centre d'Avignon, BP 91, 84140 Montfavet, France

‡Institut de Recherches Agronomiques Tropicales BP5035,
34032 Montpellier Cedex, France

§Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télédétection Spatiale,
18 Avenue Ed. Belin, 31055 Toulouse Cedex, France

(Received 25 September 1987; in final form 4 May 1988)

Abstract. This study represents part of an EEC research programme to monitor crop water conditions during the south Saharan rainy season using satellite data. Primarily focused on the Senegalese area, it was mainly performed using Meteosat daytime thermal infrared data. The purpose was to establish a relationship between the satellite-derived land surface temperatures (T_s) and the actual evapotranspiration (ET). After a preliminary study based on data from 1979 and 1983, the emphasis was put on the summers of 1984 and 1985. About thirty dates were selected for cloud-free conditions for each rainy season. Resulting surface temperatures were compared to measured rainfall and computed ET from the IRAT water-balance model for ten agrometeorological stations on a north-south transect depicting a steep water-balance gradient. The linear relationship obtained between ΣT_s and the cumulative rainfall is shown and the possible applications to rainfall mapping are discussed. This methodology is shown to be feasible, in spite of problems with the computation of absolute T_s values. ET maps and rough estimates of millet yield so derived are presented tentatively. An extension to the whole Sahelian zone is proposed, using both ΣT_s products elaborated from Meteosat routine processing and Global Vegetation Index data from NOAA-AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). Their time integrations over the whole rainy season are linearly related to cumulative rainfall which displays their complementary potential for monitoring crop water status.

1. Introduction

Within the frame of the global action 'Caractérisation par les techniques de télédétection de la désertification à la périphérie du Sahara' undertaken by the European Economic Community (EEC), Directorate of Development (DG8/A2), a research programme has been developed by three French laboratories for assessing the possible use of meteorological satellites for monitoring crop water conditions during the rainy season in the Sahelian area. The project was mainly focused on Senegal, both because of the high variation in rainfall (ranging from 150 mm in the Senegal valley to about 400 mm at the latitude of Dakar during the period studied, which corresponds to a distance of nearly 300 km) and the existence of a dense agrometeorological network.

2. The objectives

Using recent research work carried out by the Station de Bioclimatologie INRA d'Avignon about the use of meteorological satellite thermal infrared (IR) data to

estimate evapotranspiration (see Seguin *et al.* 1985, for a global review), the objectives were three-fold.

(a) To check the possible use of satellite data during the rainy season to assess the spatial extent of rain episodes on a global scale. (b) To evaluate the ability of mapping the actual evapotranspiration (ET) by using a simplified relationship as suggested by Jackson *et al.* (1977) and thereafter improved and checked both by experimental work and theoretical analysis (Seguin *et al.* 1982, Seguin and Itier 1983 and Seguin *et al.* 1985). This relationship is

$$ET_d = R_{nd} + A - B(T_s - T_a)$$

where daily ET (ET_d) is computed, for each pixel, from the daily net radiation (R_{nd}), the surface temperature (T_s) is derived from satellite data and the air temperature (T_a) is measured by the ground network corresponding to the daily maximum. (c) And, finally, to test the suitability of the estimated ET for deriving maps of final yields for main crops by a combination with agroclimatological models, relying upon the regression of these yields with the ratio of the actual ET over the maximum ET (ET/ETM), thus expressing the degree of satisfaction of water needs.

In order to fulfil these objectives, the project needed full cooperation between the various collaborating bodies. It was achieved through a close collaboration between the following organizations: In France,

- (1) Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télédétection Spatiale (LERTS) (Toulouse) for the acquisition and related processing of satellite data,
- (2) Institut National de Recherche Agronomique (INRA) Station de Bioclimatologie (Avignon) for the global coordination methodology,
- (3) Institut de Recherches Agronomiques Tropicales (Montpellier) working on water-balance models and data analysis and, in Senegal,
- (4) Institut Sénégalais de Recherches Agricoles (ISRA) Service de Bioclimatologie (Bambey) for agroclimatic data and Météorologie Nationale (Dakar) for meteorological data.

The project allowed the analysis of two rainy seasons in 1984 and 1985, after some preliminary tests on a few dates in 1979 and 1983.

3. The basic data set

The study first needed climatic and satellite data during the rainy season.

3.1. Climatic data

Climatic data were derived from the ground meteorological network of the Météorologie Nationale and the agrometeorological stations of ISRA (figure 1). From this network, the following parameters were obtained: air-temperature (maximum), insolation, relative humidity, rainfall, evaporation of Class A pan and global irradiance (for four stations only).

3.2. Satellite data

We originally planned to use both Meteosat and NOAA data for this study. But, due to a lack of receiving stations in Africa at that time (Mas Palomas is now operating since July 1986), NOAA-AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) data had to be ordered from NOAA/NESDIS which involved long delays of over 1 year with a significant reduction of available scenes (due to the change of computer). Consequently, the available dates only allowed a first insight



Figure 1. The available network of meteorological and agrometeorological stations.

Table 1. List of processed dates for this study.

	Year	April	May	June	July	August	Sep- tember	October	Total number
Meteosat	1979	4			6				2
	1983			23	29			3	3
	1984		5, 8, 13, 18, 22, 30	2, 5, 12, 17, 20, 21, 22, 23, 29	4, 9, 13, 22, 23, 29	11, 17, 26			24
	1985		5, 12, 20, 29	2, 6, 10, 15, 17, 24	1, 3, 8, 17, 21, 29	4, 5, 17, 22, 24, 29, 30	8, 10, 13, 16, 18, 23, 25, 30		34
NOAA	1983			23					1
	1984			16, 22	5	13			4
	1985				7, 8, 20	4	10		5

into the characteristics of NOAA-AVHRR data and a direct comparison with Meteosat on one common day (23 June 1986). Meteosat was thus the only available satellite fulfilling the needs of our aim which was to monitor the changes and which requires at least one or two scenes per week.

After a number of selected clear days (using ISCCP-B2 format images or ground meteorological data concerning the nebulosity), computer compatible tapes (CCTs) were ordered for the European Space Operations Centre (ESOC) in Darmstadt and processed by LERTS in Toulouse. Table 1 displays the list of available dates, both with Meteosat and NOAA.

A first conclusion may be derived from table 1, considering the years 1984 and 1985 which were the true operative summers. In spite of the importance of cloud

coverage during the rainy season, the number of cloud-free days (at least for latitudes north of Gambia) was high enough (24 in 1984, 34 in 1985) and satisfactorily partitioned to allow an effective monitoring of the processes of water availability.

4. Data processing

The setting-up of the proposed methodology required the merging of climatic and satellite data at the locations of ground stations in order to make use of remote sensing for spatial extrapolation in a second phase.

For that purpose, the following operations were performed by LERTS with raw Meteosat CCTs: degradation of visible data in order to be superposable to thermal IR pixels ($5 \text{ km} \times 5 \text{ km}$), extraction of the Senegalese area, localization of ground stations and extraction of physical parameters (albedo and surface temperature). The main problem was encountered with the last basic parameter, due to the poor calibration of the thermal IR channel of Meteosat. The ESOC procedure was applied, but it only gives the temperature at the top of the atmosphere. Resulting T_s were then too low by some 10° to 20° , so that it was necessary to use atmospheric correction procedures. We used both LOWTRAN procedure and the Price model (Price 1983), with radiosonde data for the only available station of Dakar. The method suggested by Price gave the best results, both in stability and order of magnitude. They will be discussed later in this paper.

For climatic ground data, rainfall and temperature were used directly. But their main interest lay in the computation of daily ET thanks to the water-balance model developed at IRAT by Franquin and Forest (1977). For a given crop, this model uses both climatic data (rainfall and class A evaporation), soil information (the useful reserve R_u) and phenological informations on crop stages so as to compute the ratio ET/ETM and then ET on a pentad basis.

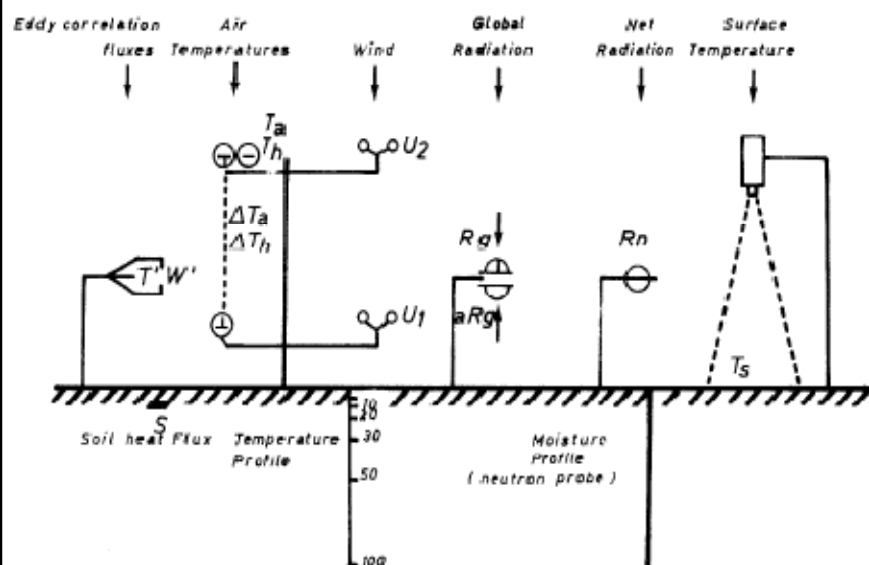


Figure 2. Sketch of the micrometeorological experiment set up in Bambe.

This model has been previously tested in the Sahelian zone (see Assad 1984, Forest and Kalms 1984, Freteaud *et al.* 1985) and appears to give satisfactory results.

The main problem encountered here was to compute a regional ET for pixels covering 25 km². The only possible solution was to use the ET outputs for the main cultivated crops (namely millet, groundnut and cowpea), as well as for mature grass, covering significant surfaces. A global ET was then derived by weighing each crop contribution by its relative importance with respect to given surfaces, this being derived from land use official statistics (see Assad 1987).

A specific set of information was also derived from a micrometeorological campaign achieved at Bambey (100 km east of Dakar) during the months of July and August 1985 (see detailed results in Lagouarde *et al.* 1985). The instrumentation, illustrated in figure 2, had three main objectives:

(1) To obtain ground-based estimates of ET by micrometeorological measurements, which, even if they could not be used for validating satellite derived ET because of the large difference in spatial scales (some are 0.01 m² compared to 25 km²), gave reference values of one given crop (here groundnut) (figure 3) and allowed to check the ET values computed by the water balance model.

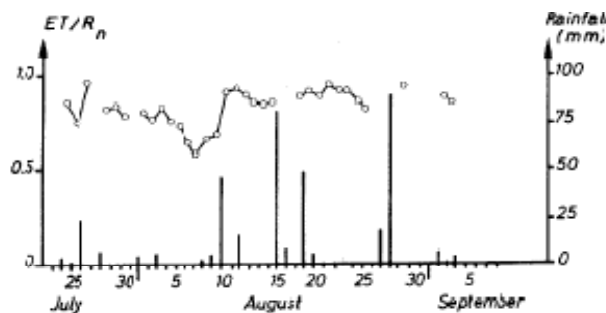


Figure 3. Daily results of the micrometeorological measurements.

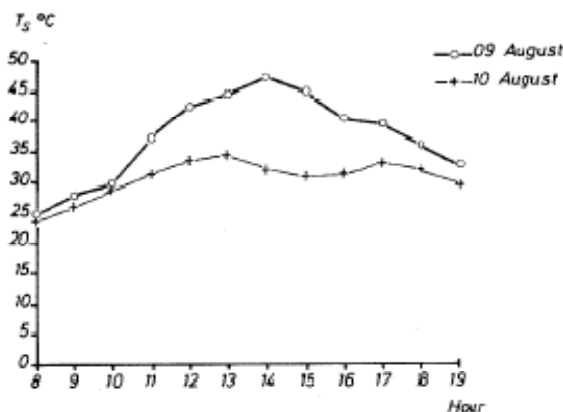
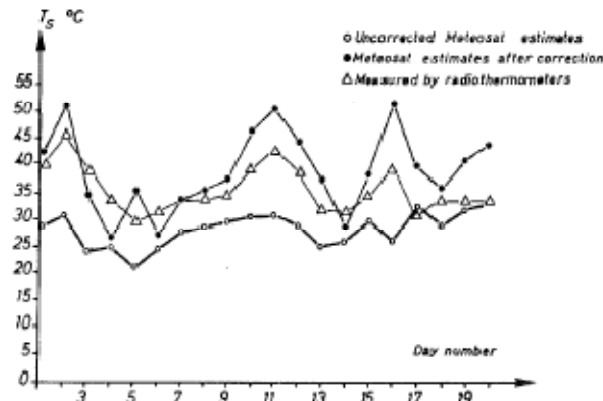


Figure 4. Daily evolution of T_s for the dates of 9 and 10 August 1985 (24 mm rainfall during the night between them).

Table 2. Results of the Bambeý micrometeorological campaign.

Period (dates in 1985)	24 July– 11 August	12–18 August	19–23 August	24–29 August
ET (aerodynamic method) (mm)	56.7	25.6	21.4	27.3
ET (soil moisture budget) (mm)	64.9	22.6	32.7	32.1

Figure 5. Comparison of ground T_s in Bambeý to Meteosat estimates without and with atmospheric correction.

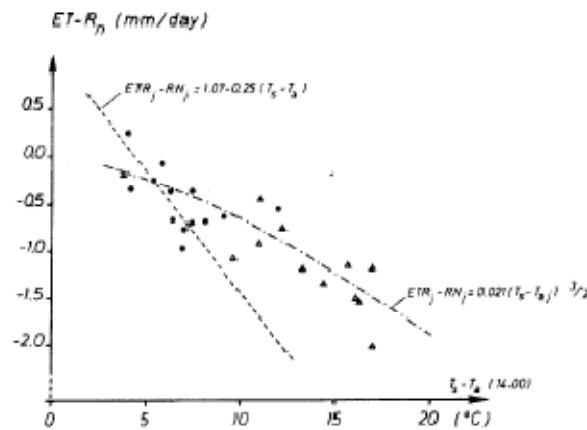
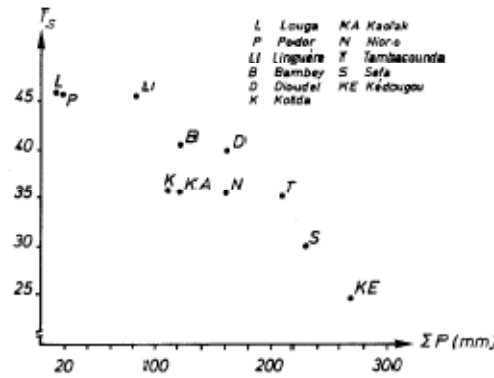
In spite of the usual difficulties of finding adequate time scales to compare atmospheric and soil-based ET estimates, the results are given in table 2.

(2) To calibrate satellite T_s data with ground measurements using radiothermometers. The main problem here lies in the large difference in spatial scales (25 km^2 compared to 1 m^2). However, the experiment allowed us to confirm both the response of T_s to soil moisture conditions (figure 4) and the general underestimation by Meteosat data with the improvement by using the Price model (figure 5).

(3) An indirect contribution of this micrometeorological campaign was also to check the significance of the simplified relationship between ET_a and T_s in a Sahelian environment whilst on a local scale. The result obtained (figure 6) displays values ranging near a slope of $0.25 \text{ mm/}^\circ\text{C}$ at the beginning of the experiment which corresponds to bare soil without a covering canopy of peanut plants and evolving towards higher values with the development of the canopy, in accordance with what can be expected with the influence of surface roughness.

5. Results obtained

The results will be presented according to the main objectives as defined in the introduction.

Figure 6. Obtained relationship between $ET_d - R_{nd}$ and $T_s - T_a$.Figure 7. Relationship between ΣT_s and cumulative rainfall for the date of 6 July 1979.

5.1. Rainfall monitoring through surface temperature measurements

The preliminary analysis of the 1979 and 1983 images confirmed the expected trend of spatial variations for T_s , grossly increasing from the wet south to the dry north. A linear relationship which appears on one given date at the beginning of the rainy season in July 1979, between T_s and the amount of rainfall since the beginning of this rainy season (figure 7), led us to compare the temporal evolution of the summation of T_s (ΣT_s) to the cumulative rainfall (ΣP) during the rainy season. The 24 dates of 1984 and the 34 of 1985 showed a slowly increasing correlation coefficient of that linear regression, allowing significant relationships by the end of the seasons (figures 8 and 9).

$$\Sigma P = 1715 - 2.88 \Sigma T_s$$

when $r^2 = 0.93$ for 1985 and

$$\Sigma P = 1457 - 2.52 \Sigma T_s$$

when $r^2 = 0.84$ for 1985.

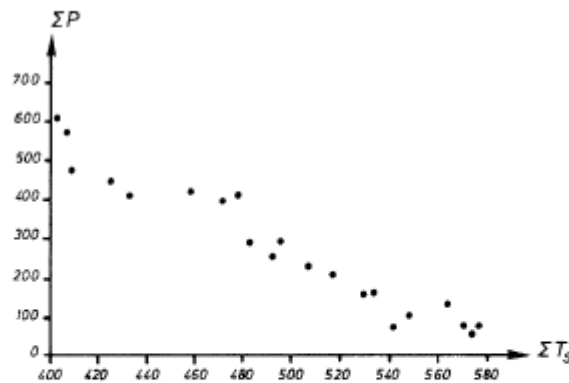


Figure 8. Relationship between ΣT_s and P at the end of the 1984 rainy season.

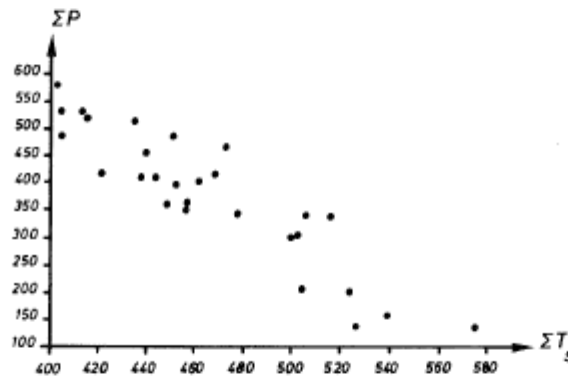


Figure 9. Relationship between ΣT_s and P at the end of the 1985 rainy season.

This result, allowing us to estimate ΣP on an annual basis with a precision of the order of 80 mm, has been obtained empirically, but it may be justified by the linear relationship between T_s and ET (as expressed by the simplified approach) and the approximately linear dependence of ET against rainfall P during the season. It may be used as a possible operational procedure for mapping rainfall and estimating the spatial extension of rainy episodes, as shown on figure 10.

5.2. Computation of regional ET

The estimation of ET by the simplified approach appeared as a difficult challenge because of the uncertainties both in the exact values of T_s and the reference ET values computed by the water-balance model at the pixel scale.

For the first point, the comparison between Meteosat and NOAA, as performed on one common day (23 June 1983) allowed us to quantify the error, as shown in figure 11.

The comparison along several transects indicated an overall mean value of the difference Meteosat–NOAA of about -3°C . If we assume that there is a

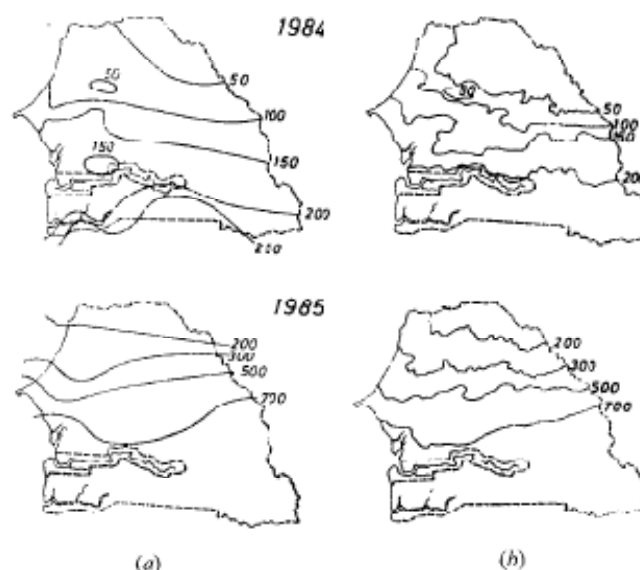


Figure 10. Comparison of rainfall maps established by climatological ground surveys (a) to those derived from Meteosat and (b) to those in Senegal.

difference of 1 deg C due to the difference in time (13.30 GMT for Meteosat, 14.30 GMT for NOAA) and some 4 deg C of underestimation for NOAA split window T_s measurements in these ranges of temperature (Lagouarde and Kerr 1985), we obtain a final underestimation of T_s by around 8 deg C for Meteosat, which corresponds to the order of magnitude of the correction derived from Price's model.

Consequently, the accuracy of T_s estimates may be appreciated to be of ± 4 deg C. This error, cumulated with errors for air temperature (± 1 deg C) and the uncertainties on ET computation by the water balance approach (which may be estimated to ± 1 mm/day), explains the somewhat large (± 1.5 mm/day) dispersion appearing in the established simplified relationship, especially in 1985 (figure 12).

However, these first results may appear encouraging, due to the limitations of this study. A further test with NOAA-AVHRR (allowing us to reduce significantly the uncertainty in T_s by using the two IR channels and the split window method adapted for land surfaces) appears as a necessity to establish clearly the potentialities of the simplified approach. Moreover, the access to the LAC (local area coverage) resolution (1 km^2) by the Mas Palomas receiving station, could allow the validation of ET derived as described above with the estimates from ground measurements.

5.3. The application to yield mapping

The high dependence of the Sahel's main products on water conditions, meant that we can hope to be able to propose the mapping of rough estimates of expected yields at the end of rainy seasons using remotely-sensed data. For that purpose, we need agrometeorological models of actual yields related to water parameters. The main problem lies in the only approximate value of production statistics available for establishing these models.

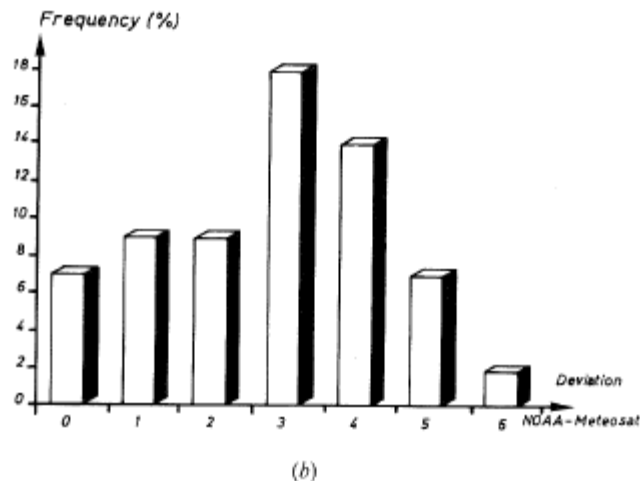
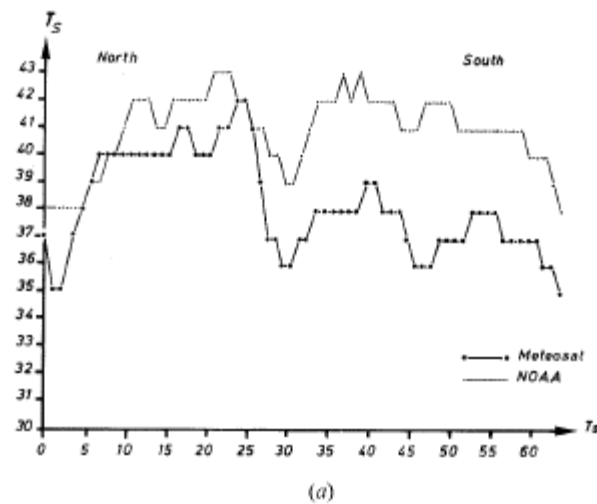


Figure 11. Comparison between Meteosat and NOAA along a north-south transect (a) and the resulting histogram of the deviation (b).

In our case, we used statistics from the Department of Agriculture giving main yields for each administrative district for the period 1974–1983. If the dispersion with global rainfall data is not surprising ($r^2 = 0.28$ for the regression displayed in figure 13 (a)), the relationship with the global ET/ETM ratio during the whole rainy season is satisfactory (figure 13 (b)). The equation obtained is

$$\text{Yield (kg/ha)} = 116 + 1000 (\text{ET/ETM})$$

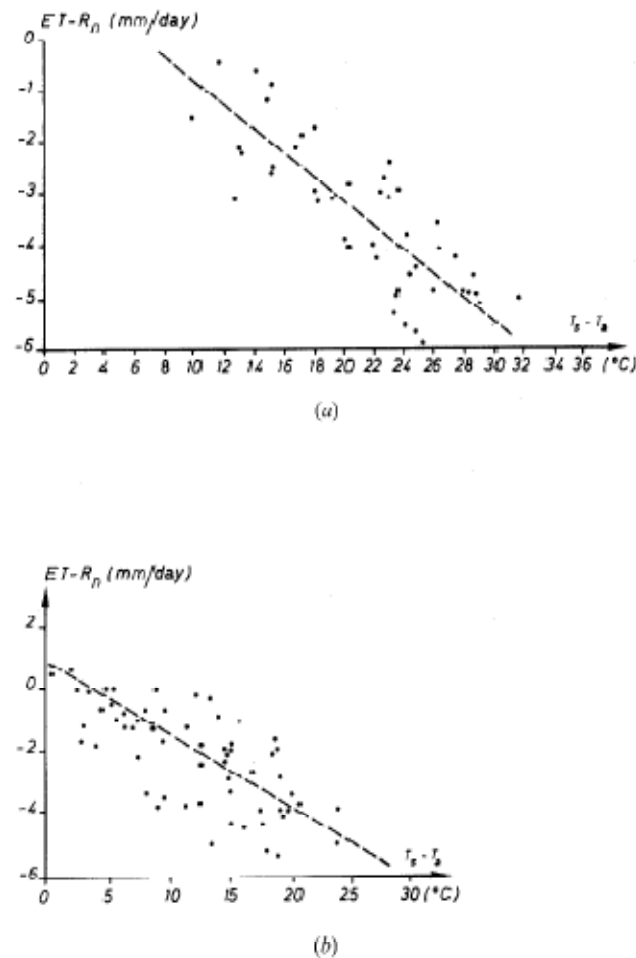


Figure 12. Established simplified relationships for 1984 (a) and 1985 (b). The dotted line corresponds to the expression $ET - R_n = 1.00 - 0.25 (T_s - T_a)$.

when $r^2 = 0.76$. It may be used to propose a map of millet production in Senegal by linking that relationship to the estimates of ET/ETM, spatially derived from the ET computation (figure 14).

Due to the cumulative dispersion encountered both in ET computation and yield estimates, these maps have obviously to be considered with great care and the approximate nature of the yields borne in mind. They are presented here more to show the possible impact of the methodology we have defined than to propose a direct exploitation. It should be noted, however, that marked differences appear inside a single administrative district, which may be a significant output of satellite data.

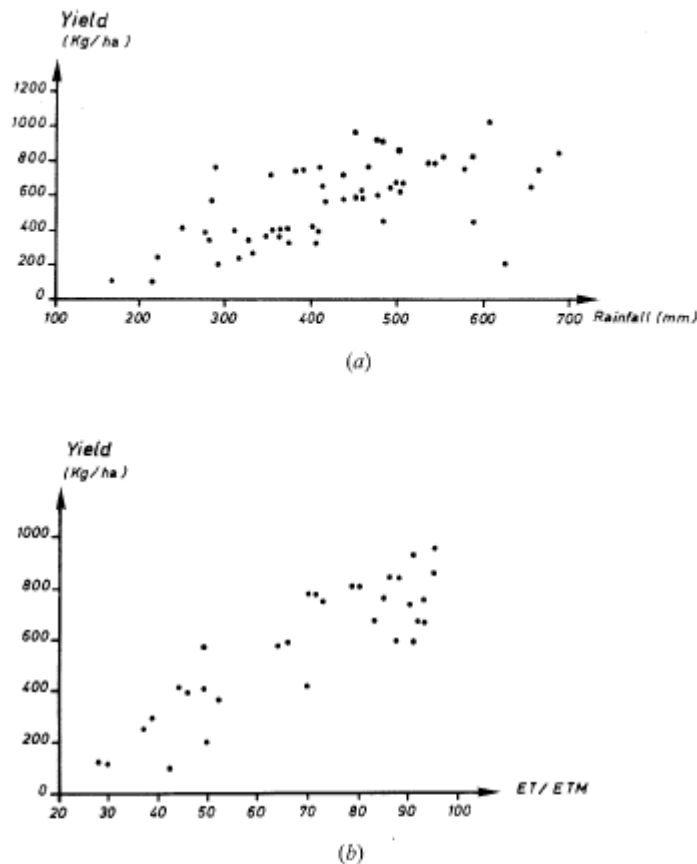


Figure 13. Relationship of millet annual yield with rainfall (a) and ET/ETM (b).

6. Complementary results with vegetation index and extension to the Sahelian region

A complementary study (funded by the Joint Research Centre, Ispra, Italy, and the French Ministère des Relations Extérieures) has allowed us to test, in a somewhat similar way to that work concerned with thermal IR, the use of NDVI (normalized difference vegetation index) widely studied recently (Tucker *et al.* 1985, Justice *et al.* 1985, Malingreau 1986, etc.). The availability of global NDVI on the approximately 20 km \times 20 km grid base in Senegal for the year 1984 allowed us to establish clearly its interest in these regions for the monitoring of crop conditions. For instance, figure 15 clearly shows the difference between two localities; Matam and Linguere (nearly similar in time with average values of 530 mm from FAO data), both affected by the drought in 1984 (especially Matam).

Crop conditions may be discernible from the maximum NDVI obtained, as shown in table 3 but also from the integrated NDVI mean value throughout the season. The relationship between NDVI and ΣP for 80 stations in the Sahel displays a clear, almost linear relationship (figure 16) thus making NDVI data very complementary to ΣT_s (figure 17), as noted and explained by Seguin (1986).

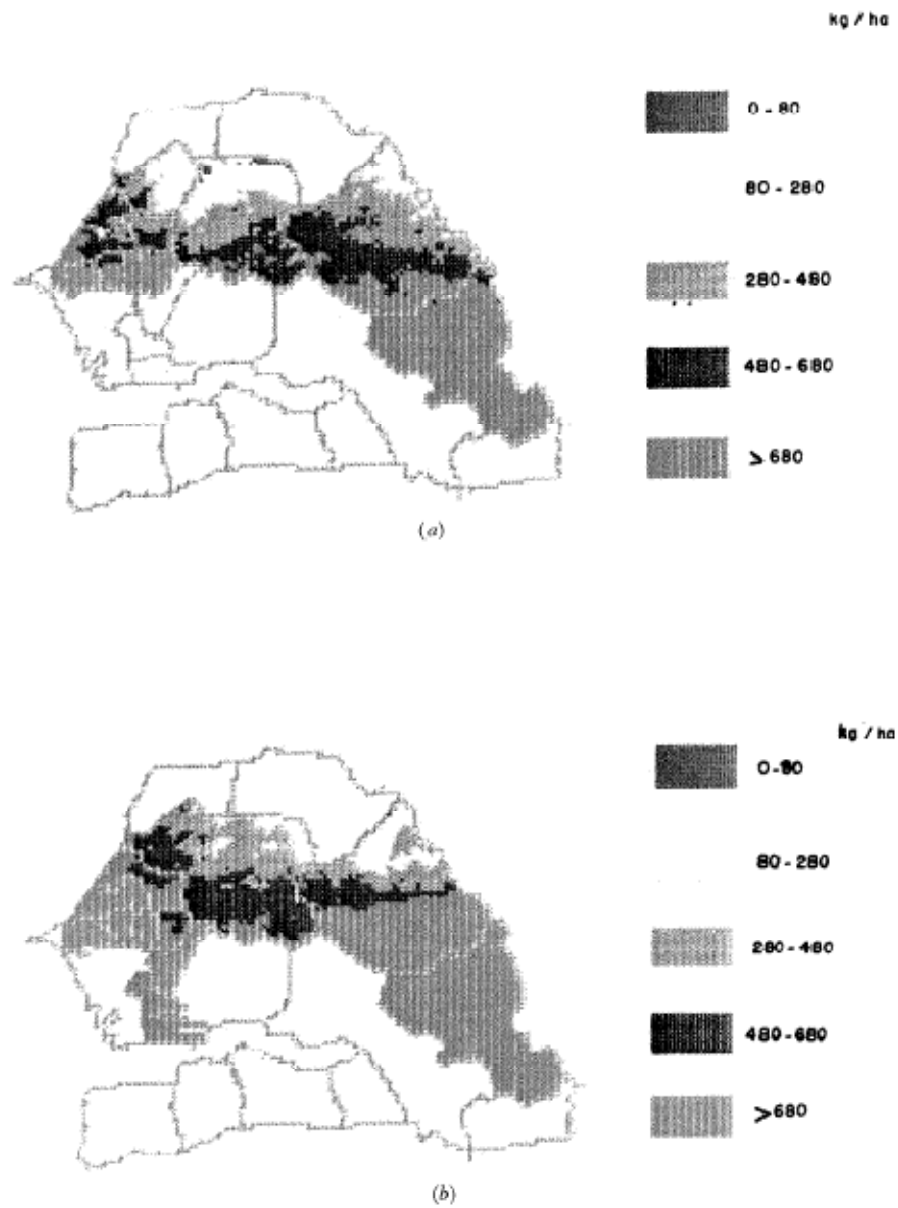


Figure 14. Maps of (a) ET for one day (17 July 1984) and (b) rough estimates of millet production (1985).

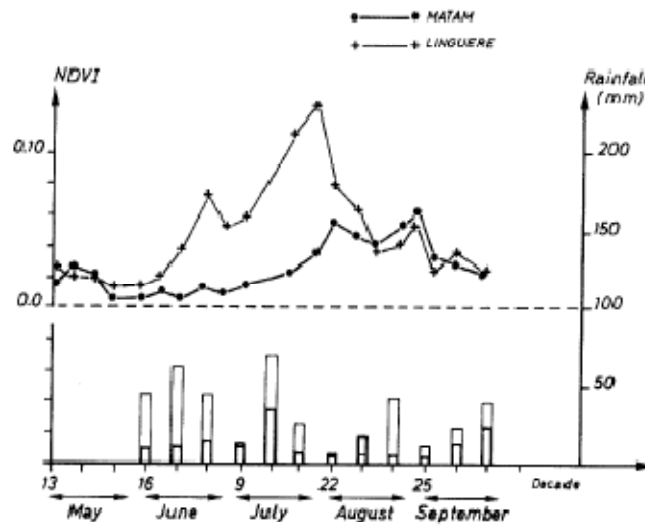


Figure 15. Comparison of weekly NDVI for Matam and Linguere during the summer 1985, together with rainfall per decade.

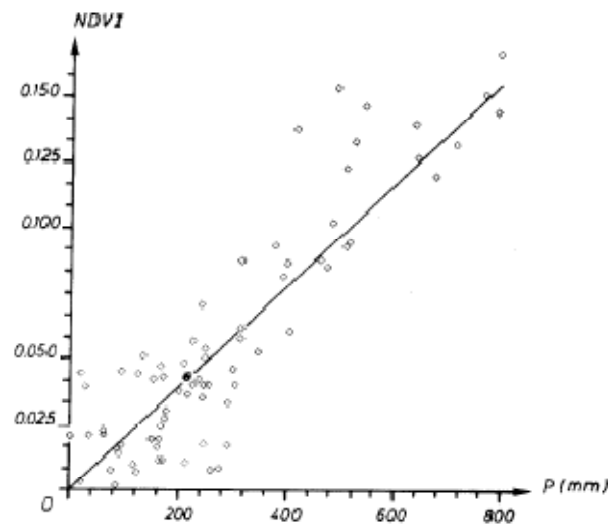


Figure 16. Relationship between NDVI and summer rainfall for 1984 (80 stations of Sahel-Agrhymet network).

A comparison between integrated NDVI and crop-water-use parameters was also attempted at the scale of the whole Sahelian region. As the ratio ET/ETM is not computed routinely, we used the values of WRSI (water requirements satisfaction index) developed by FAO (see Frère and Popov 1986) as computed by the Agrhymet Centre in Niamey. The relationship obtained (figure 18) displays an exponential

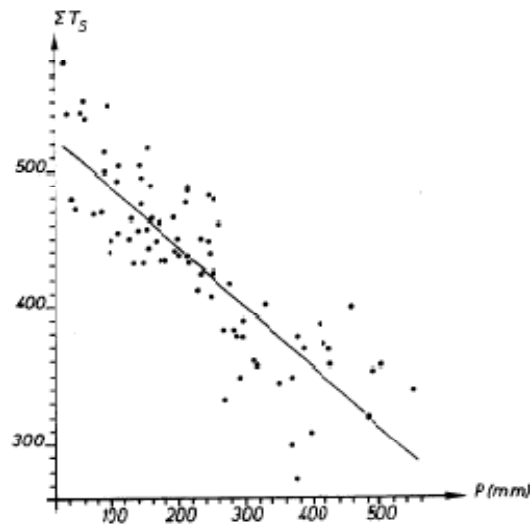


Figure 17. Relationship between ΣT_s and summer rainfall for 1984 (30 stations of Sahel-Agrhyment network).

Table 3. Maximum NDVI values for 5 stations of Senegal, with the summer rainfall for 1984.

Station	Rainfall (mm)	Maximum NDVI
Louga	163	0.03
Matam	191	0.06
Thilmakha	233	0.08
Linguere	374	0.13
Bambey	423	0.18

relationship, with an acceptably small dispersion in the useful range (for WRSI ≥ 0.5 – 0.6 , because no significant production could be expected for smaller values). The relationship obtained, which is quite similar to known relationships between crop production and WRSI in dry climates, could be used to draw maps of final WRSI at the end of the rainy season and then maps of expected production, as an alternative to the approach by the summation of surface temperatures described previously.

7. Conclusion

From the preliminary study, mainly based on a methodological approach, we may conclude the following:

- (1) That the use of clear-day thermal IR data may give valuable estimates of rainfall for long periods (at least 1 month), being thus complementary to studies attempting to compute rainfall from cloud indexing on a short-term basis. As such, data from Meteosat or NOAA could be used to monitor rainfall's spatial distribution during the rainy season.

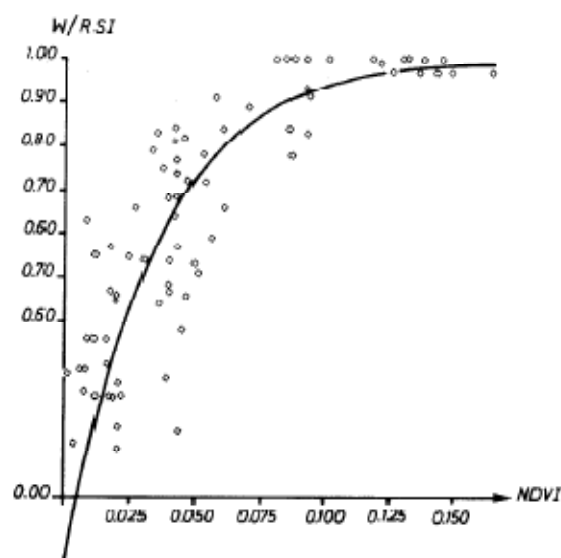


Figure 18. Relationship between NDVI and final WRSI as computed by Agrhymet Centre for 80 stations. The black line corresponds to the best adjustment $WRSI = 100 [1 - \exp(-28.5 \cdot NDVI + 0.18)]$.

- (2) That the project of computing ET from the same thermal IR data may appear feasible, in spite of the problems arising both from the precision in the estimation of T_s , and the computation of ground ET being used as references. However, the use of Meteosat for that purpose is not adequate in its present stage. NOAA-AVHRR appears better suited, so that studies will be pursued with data received in Mas Palomas.
- (3) The possible way to derive maps of expected approximate yields has been demonstrated. The problem here lies in the uncertainties about the true production in the Sahelian context. As more precise statistics may not be obtained very soon we can state that remote sensing information cannot be taken as very precise statements (since no precise reference exists), but could be useful in outlining expected yields and their spatial variation by the end of rainy season.
- (4) That surface temperature appears to be complementary to vegetation indices in these regions and the simultaneous analysis of these two parameters will be of great interest, especially in the case of NOAA-AVHRR since it is the only meteorological satellite to combine the two types of information.

Acknowledgments

As mentioned in the text, these studies were funded by EEC-DG8A2 (Action 'Désertification', Project no. 2), Joint Research Centre Ispra (Contract no. 2404.84.07.FD.ISPRA) and the French Ministère des Relations Extérieures (Contract no. 6400.85.15276.00). The authors would like to mention the work of M. D. Diagne in ISRA Bambey and M. Ndiaye of the Météorologie Nationale in Dakar. They are also grateful to B. Guillot (Orstom Lannion) for having provided relevant

Meteosat processed data for our work, and to scientists of the Agrhymet Centre of Niamey for supplying climatic data.

References

- ASSAD, E., 1984, Télédétection et bilan hydrique: application à l'évapotranspiration régionale. Mémoire de DEA Sciences de l'eau et aménagement. Internal memorandum USTL, Montpellier, France.
- ASSAD, E., 1987, Utilisation des satellites météorologiques pour le suivi agroclimatique des cultures en zone sahélienne: cas du Sénégal. Doctoral thesis. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, Montpellier, France.
- FOREST, F., and KALMS, J. M., 1984, Influence du régime d'alimentation en eau sur la production du riz pluvial. Simulation du bilan hydrique. *Agronomie Tropicale*, **39**, 42–50.
- FRANQUIN, P., and FOREST, F., 1977, Des programmes d'évaluation et analyse fréquentielles des termes du bilan hydrique. *Agronomie Tropicale*, **32**, 1–22.
- FRERE, M., and POPOV, G. F., 1986, Early agrometeorological crop yield assessment. FAO Plant production and protection paper No. 73. Food and Agriculture Organization, Rome, Italy.
- FRETEAUD, J. P., CORTIER, B., and DIAGNE, M., 1985, Simulation du bilan hydrique et suivi agroclimatique de l'hivernage. Internal report. Institut de Recherches Agronomiques Tropicales, Montpellier, France.
- JACKSON, R. D., REGINATO, R. J., and IDSO, S. B., 1977, Wheat canopy temperature: a practical tool for evaluating water requirements. *Water Resources Research*, **13**, 651–656.
- JUSTICE, C. O., TOWNSHEND, J. R. G., HOLBEN, B. N., and TUCKER, C. J., 1985, Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, **6**, 1271–1318.
- LAGOUARDE, J. P., and KERR, Y., 1985, A calibration of the thermal NOAA-AVHRR sensor. *Proceedings of the International Satellite Land Surface Climatology Project Conference held in Rome in December 1985*. ESA Publication SP-248 (Paris: European Space Agency), p. 365.
- LAGOUARDE, J. P., KERR, Y., ASSAD, E., and COGNET, M., 1985, Résultats d'une campagne de mesures micrométéorologiques au Sénégal pendant l'hivernage 1985. Internal report, Station de Bioclimatologie Institut National de Recherche Agronomique d'Avignon, France.
- MALINGREAU, J. P., 1986, Global vegetation dynamics: satellite observations over Asia. *International Journal of Remote Sensing*, **7**, 1121–1147.
- PRICE, J. C., 1983, Estimated surface temperatures from satellite thermal IR data. A simple formulation for the atmospheric effect. *Remote Sensing of Environment*, **13**, 353–363.
- SEGUIN, B., BAEZ, S., MONGET, J. M., and PETIT, V., 1982, Utilisation de la thermographie infra-rouge pour l'estimation de l'évaporation régionale. I Mise au point méthodologique sur le site de la Crau. *Agronomie*, **2**, 7–16.
- SEGUIN, B., and ITIER, B., 1983, Using midday surface temperature to estimate daily evaporation from satellite thermal IR data. *International Journal of Remote Sensing*, **4**, 371–383.
- SEGUIN, B., LAGOUARDE, J. P., and KERR, Y., 1985, Estimation of regional evaporation using midday surface temperature from satellite thermal IR data. *Proceedings of the ISLSCP Conference held in Rome in December 1985* ESA SP-248 (Paris: European Space Agency), pp. 339–345.
- SEGUIN, B., 1986, Rôle de l'évapotranspiration dans les processus globaux. Apport de la télédétection par les satellites météorologiques. Paper presented at XXVIe COSPAR, held in Toulouse, France in July 1986. And 1989, *Advances in Space Research*, (in the press).
- TUCKER, C. J., VAN PRAET, C. L., SHARMAN, M. J., and VAN ITERSUM, G., 1985, Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel 1980–1984. *Remote Sensing of Environment*, **17**, 233–249.

2.1.2 Indices de végétation et bilan hydrique des cultures

Kerr Y.H., Imbernon J., Dedieu G., Hautecoeur O., Lagouarde J.P., Seguin B., 1989. NOAA AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring. *International Journal of Remote Sensing*, 10 (4-5) : 847-854.

INT. J. REMOTE SENSING, 1989, VOL. 10, NOS. 4 AND 5, 847-854

NOAA AVHRR and its uses for rainfall and evapotranspiration monitoring

YANN H. KERR†

Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology,
4800 Oak Grove Drive, Pasadena, California 91109, U.S.A.

J. IMBERNON

Institut de Recherche en Agronomie Tropicale (IRAT),
Avenue du Val de Montferrand, BP 5045, 34032 Montpellier, France

G. DEDIEU

Laboratoire d'Etudes et de Recherches en Télédétection Spatiale (LERTS),
18 Avenue Edouard Belin, 31055 Toulouse Cedex, France

O. HAUTECOEUR

Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Toulouse (ENSAT),
145 Avenue de Muret, 31076 Toulouse Cedex, France

and J. P. LAGOUARDE and B. SEGUIN

Institut National de la Recherche Agronomique (INRA),
Station de Bioclimatologie, Domain St Paul, BP 91, 84140 Montfavet, France

Abstract. NOAA-7 Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) Global Vegetation Indices (GVI) were used during the 1986 rainy season (June-September) over Senegal to monitor rainfall. The satellite data were used in conjunction with ground-based measurements so as to derive empirical relationships between rainfall and GVI. The regression obtained was then used to map the total rainfall corresponding to the growing season, yielding good results. Normalized Difference Vegetation Indices (NDVI) derived from High Resolution Picture Transmission (HRPT) data were also compared with actual evapotranspiration (ET) data and proved to be closely correlated with it with a time lapse of 20 days.

1. Introduction

In the area of the Sudanese Sahel, as in most semi-arid areas, vegetation growth is triggered by the first rains, and the completion of the growing cycle is dependent on water availability throughout the cycle. Water availability is, in fact, the main limiting factor for vegetation growth. As irrigation is not common practice in most areas, rainfall is a key parameter. It has been shown by various authors (see Hielkema *et al.* 1986 for instance), that primary production is directly linked with the amount of water available in tropical areas where annual rainfall ranges between 100 and 800 mm. Furthermore, it has been shown (Dancette 1983) that in such areas, rainfall is strongly related to yield. Consequently, for practical and economical reasons, it seems necessary to be able to monitor rainfall on a global scale.

The ground network of rainfall gauges could be the means to achieve such a goal but, since the spatial distribution of rain is very variable (Snijders 1986), the network density is never sufficient. Moreover, the measurements made are not always reliable and the multiplicity of organizations collecting data makes its retrieval somewhat cumbersome and lengthy. Consequently, ground measurements can only be used in a limited number of points and cannot be used operationally on a global scale.

As a standardization of ground data retrieval and a multiplication of ground measuring stations are not possible economically and practically, it is necessary to investigate how satellite data could provide a satisfactory answer to the global assessment of water availability during the rainy seasons. Polar orbiting meteorological satellites can provide a uniform and global monitoring tool over large areas with the possibility of getting data within a relatively short time and their potentialities are tested in this study.

The first part of this paper deals with a statistical analysis of the relationship between Global Vegetation Indices (GVI) and rainfall. GVI are time composites of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) (Schneider *et al.* 1981) as derived from the Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) on board the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) polar orbiters. A quantitative method for rainfall mapping is then described. Comparisons between precipitation and GVI have already been performed (Justice *et al.* 1985, Hielkema *et al.* 1986), but we are not aware of any study covering such a variation in rainfall, soil type, vegetation and climate.

During recent years the area of the Sudanese Sahel has been adversely affected by severe droughts stressing the need for a better understanding of the influence of surface parameters on climate. For this, it is necessary to analyse the climatic sensitivity to changes in surface parameters and to investigate how satellite data could provide quantitative information on the vegetation-hydrologic cycle feedback (see Sellers 1985). As a matter of fact, it has been shown empirically (Asrar *et al.* 1985) and theoretically (Sellers 1985, Tucker and Sellers 1986) that a near linear relationship existed between the NDVI and the photosynthetically active radiation (PAR) absorption coefficient, which in turn can be related to the instantaneous dry biomass production. As the latter is closely related to water losses, i.e. transpiration, it seems pertinent to analyse the relationship between vegetation reflectance data and actual evapotranspiration. The second part of this paper deals with this topic.

2. Choice of study area

Located between latitudes 12° N and 17° N in West Africa, Senegal covers three main climatic areas. From the south towards the north the climate is of Guinean, Sudanian and Sahelian type. Along the western coast the oceanic influence is present while the eastern part has continental characteristics.

The mean annual rainfall ranges from over 1000 mm in the south to 150 mm or less near the Senegal river in the north. The rainy season usually starts in May (south of the area) and ends in October. The main crops are millet, cow pea and ground nut mixed with fallow.

This area was selected for study because it offers a wide range of annual rainfall values across a relatively small area and because the ground network is relatively dense and reliable.

3. Comparison between NDVI and precipitation

3.1. Data set

Satellite data and ground data are used. The satellite data set spans over 4 months for Senegal. It consists of temporal composites made from daily acquisitions of Global Area Coverage (GAC) data where only the radiances in bands 1 (visible), 2 (near-infrared), and 4 (thermal infrared 10.3–11.3 μm) corresponding to the highest value of the NDVI are kept over a period of 1 month. This processing is necessary since GAC data are prone to be contaminated by clouds and altered by variations of the atmospheric characteristics as well as the viewing angles (Holben 1986). It allows one to get data over large areas under cloud-free conditions, with a minimum influence of the atmosphere and a viewing angle as close as possible from nadir. The preprocessing was carried out by NOAA/NESDIS Assessment and Information Services Center (AISC), Models Branch, Columbia, Missouri, U.S.A., under USAID Office of Foreign Disaster Assistance Project 'Use of NOAA Climatic Impact Assessment Technology by Countries of the Sahel and Horn Regions of Africa for Operational Crop Monitoring and Range Management'. The period over which these composites were available covers the months of June to September 1986 inclusive. The data are binned on a regular latitude-longitude grid with a resolution of 0.04°.

The ground data consist of rainfall measurements as recorded in stations scattered over the country. These precipitation data sets were provided by the Météorologie Nationale and the Institut Sénégalais de Recherche Agricole. The actual number of stations available consists of 63 points scattered over the country, but some have to be discarded due to proximity to the ocean which would lead to mixed pixels (sea and land) or due to missing data. Because of this only 59 ground stations are actually used.

3.2. Data processings

As the aim of this study is also to find a reliable, simple and cost-effective method of estimating rainfall so that it could easily be transferred to local organizations, the processing is kept as simple as possible.

The ground measurements are simply checked for sensibility and the stations are located on the satellite images. The values are accumulated (i.e. values are added) on a month-by-month basis, starting in May.

The GVI is computed for each month and then accumulated, starting in June. For each ground station, the values of the pixels located in a three by three window centred on the station are then extracted and the corresponding mean value computed. This leads to two sets of values per station, cumulative GVI and cumulative rainfall. From these, a regression is performed in order to derive the empirical relationship between the two sets.

The linear regression found is then applied to the image of the cumulative GVI to produce the precipitation map. The method is thus very simple, cost-effective and rapid.

3.3. Results and discussion

Figure 1 shows the scatter plots of the GVI against the cumulative rainfall at the end of the first month. The linear regression gives

$$CR = 972.2 \times CGVI - 15.0 \quad (1)$$

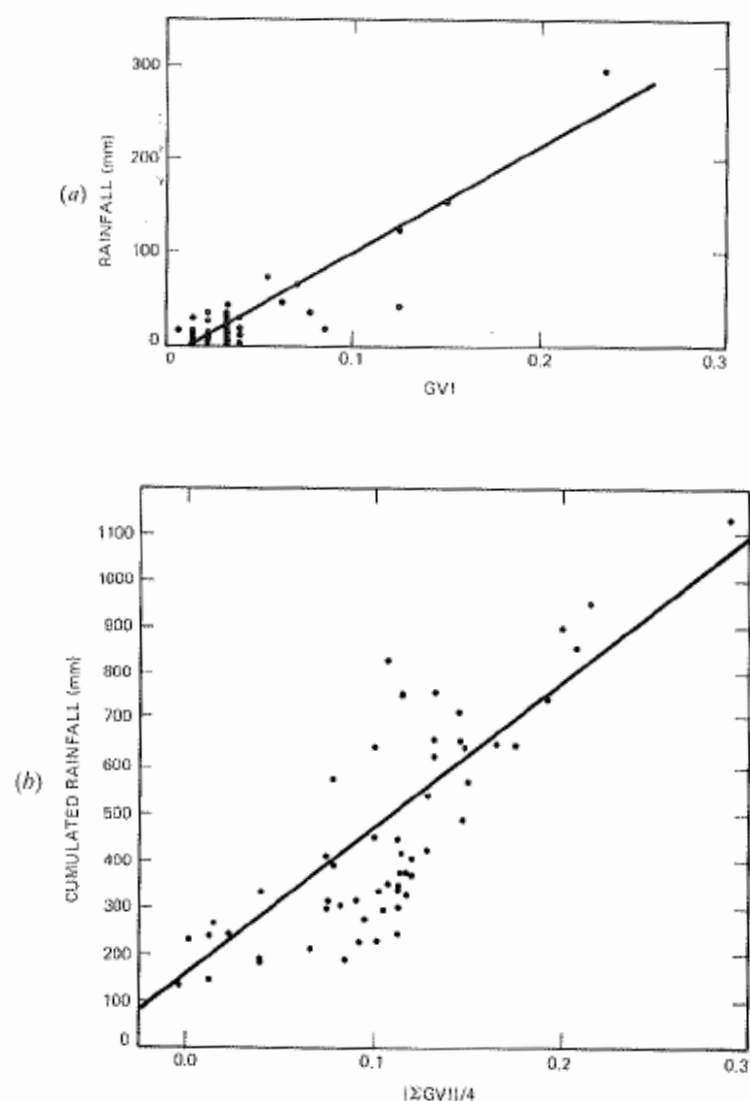


Figure 1. Scatter plots of cumulative rainfall versus GVI for 59 ground stations in Senegal, (a) June 1986, and (b) the period June to September 1986.

where CR is the cumulative rainfall and CGVI the cumulative GVI divided by the number of measurements. The correlation coefficient is $r=0.835$ and the standard error estimate (SEE) is 17.1 mm (100 per cent of the mean value). Even though the correlation coefficient seems good (due to there being a few points with high values), it can easily be seen that the scatter is quite large. This is mainly due to the fact that at the beginning of the season most of the surface is covered by very dry vegetation or is bare and, in this case, the NDVI is not well suited. By the end of the season (figure 1 (b)) the scatter plot tends to concentrate along the regression line and

the correlation coefficient is $r=0.863$ and $SEE=130$ mm (28 per cent of the mean). The equation for the regression line is

$$CR = 3391.2 \times CGVI + 87.1 \quad (2)$$

The scatter of the points is generally not very wide with some exceptions. Some values are underestimated, most probably due to the important rainfall which occurred in September (only one value is used per month and October data would have been very useful to account for these rains). Some values are overestimated, which can be explained by the 'green belts' around towns, irrigation areas, or water bodies. Equation (2) is then applied to the cumulative GVI image giving the rainfall map predicted from satellite data shown on figure 2.

This map is much more detailed than any map produced by conventional means and gives useful information on parts of the country which are not very well covered by ground stations. The results also show that such an empirical method could be used with a satisfactory accuracy over quite a wide range of climatic conditions since the study area undergoes great variation in rainfall. The method, however, needs validation over several years. It must also be stressed that monthly composites are used, i.e. one measurement per month, and that the data for October were missing. Further improvements of the results could be achieved if the whole rainy season was studied with finer time sampling, adapted to the cloud-cover characteristics. Finally, the method is not very efficient when vegetation is very sparse, in which case the use of passive microwave radiometry in conjunction with the NDVI might be necessary (see Becker and Choudhury 1988).

4. Comparison between NDVI and evapotranspiration

4.1. Satellite data

High Resolution Picture Transmission (HRPT) data collected by the Mas Palomas receiving station have been used. The data have been preprocessed as described by Kerr (1986). Because of the cloud cover, and in order to reduce the viewing angle variations and to avoid problems with aerosols, only ten dates could be selected: 7, 18 and 27 July, 4 and 24 August, 16 and 22 September and 1, 10 and 23 October 1986.

As the time scale that is mostly used in climatology is the five-day period, the data set is interpolated (maximum likelihood) so as to give the equivalent temporal sampling. This approach is valid because, over a five-day period, the NDVI can be considered as constant.

The computed NDVI are then extracted over a 3 by 3 pixel window centred around a ground station and the mean value is considered. The results obtained for three locations is described.

4.2. Ground data

The evapotranspiration data are obtained through the Institut de Recherche en Agronomie Tropicale (IRAT) water budget model (Forest 1984). This model takes into account rainfall, runoff, stored water and agronomical parameters. Potential evapotranspiration (PET) is computed from Class A pan data. At each time step the maximum evapotranspiration (MET) is computed as a function of phenological stage and PET (Frere and Popov 1979). ET is then derived through a generalization of the Eagan algorithm (Eagan 1971) and is a function of PET and available water in the root extraction zone. PET and ET are integrated over five-day periods and ET is

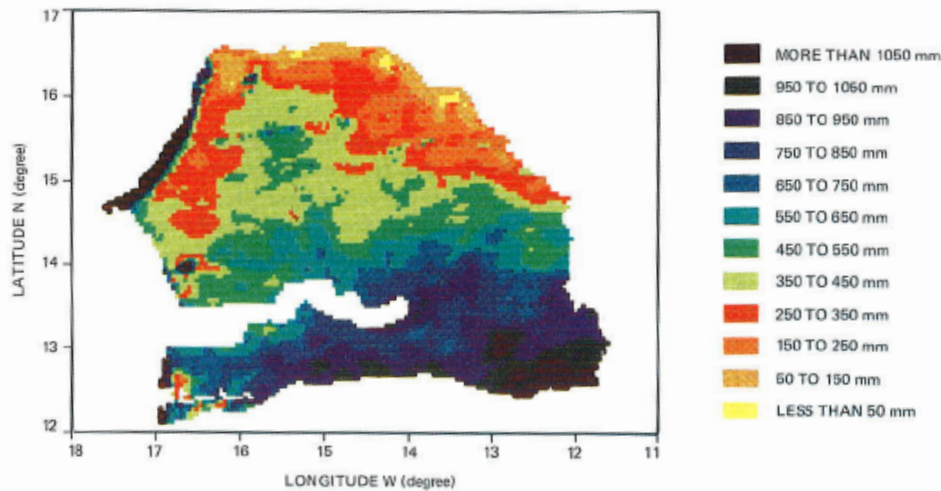


Figure 2. Cumulative rainfall map for Senegal (June to September 1986) as derived from AVHRR global vegetation indices.

estimated for different types of vegetation (fallow, millet, ground nut and cow pea). The estimated values of ET derived from this model are in good agreement with *in situ* measurements (Forest and Kalms 1984).

4.3. Results and discussion

Figure 3 shows a plot of the cumulative NDVI and the cumulative ET (for millet) for the three stations. It must be noted that the ET curve has been shifted by 20 days and fits the NDVI curve almost exactly. For figure 3(a) to (c) the correlation coefficients and SEE are, respectively, $r=0.999$ and $SEE=3.7$ mm (3 per cent of the mean), $r=0.994$ and $SEE=7.3$ mm (7 per cent of the mean), and $r=0.993$ and $SEE=6.9$ mm (9 per cent of the mean). The very good fit between the two data sets shows that the relationship between the satellite-measured radiances and the water losses is almost linear. The next step is to derive a simple model relating the PAR absorption coefficient to ET.

The results also show a very important point which has not yet, to our knowledge, been discussed, and that is that there is a time lapse of about 20 days between the occurrence of a physiological factor (i.e. ET) and its effect on the NDVI.

5. Conclusion

The first part of this paper describes how rainfall can be quantitatively monitored with GVI data. The method is very simple and cost-effective and could easily be implemented for routine monitoring in Sahelian countries. The accuracy could be improved by using a finer time sampling (typically ten days) and, eventually, by the joint use of passive microwaves in areas where the vegetation is sparse. Nevertheless, the method presented compares very favourably with traditional methods and allows a fine mapping of the isohyets, even in areas where the ground network density is very low or not reliable.

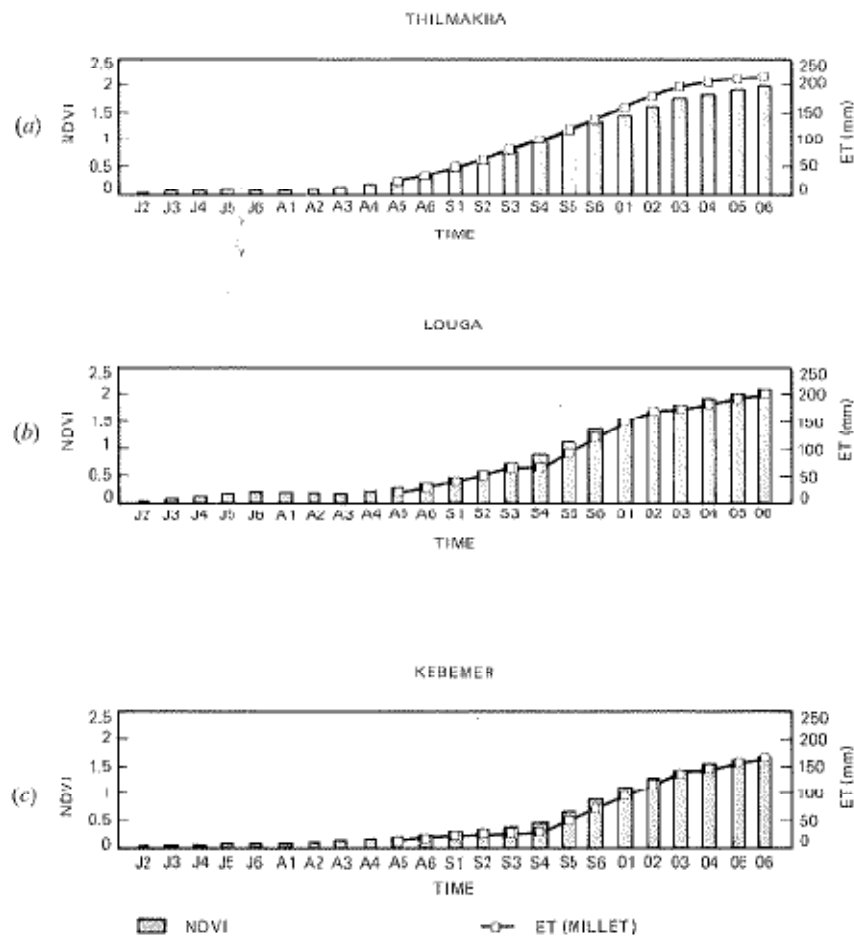


Figure 3. Evolution of the cumulative NDVI and the cumulative ET (shifted 20 days) during the growing season 1986 for three locations. The abscissa represents the time of year (the letter is the initial of the month and the figure the number of the five-day period). (a) Thilmakha; (b) Louga; (c) Kebemer.

In the second part of the paper, preliminary results show that a linear relationship between NDVI and ET exists with a very good correlation, and with a time lapse of 20 days between the cause (environmental factors) and the effect (NDVI).

This type of relationship is very useful in analysing the vegetation-hydrologic feedback mechanisms, while the understanding and modelling of how the vegetation reacts to rainfall events is the next necessary step.

The results gained from these studies highlight the great potential of AVHRR data for agronomical and climatic applications.

Acknowledgments

The authors would like to thank NOAA/NESDIS Assessment and Information Services Center, Models Branch, for providing the GVI data set. The Météorologie

Nationale Sénégalaise and the Institut Sénégalais de Recherche Agronomique are also to be thanked for providing ground data. The work was funded by the Action Thématique Programmée 'Programme Interdisciplinaire de Recherches sur l'Environnement' (PIREN).

References

- ASRAR, G., KANEMATSU, E. T., JACKSON, R. D., and PINTER, P. J., Jr, 1985, Estimation of total above ground phytomass production using remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, **17**, 211-220.
- BECKER, F., and CHOUDHURY, B. J., 1988, Relative sensitivity of normalized difference vegetation index (NDVI) and microwave Polarization difference index (MPDI) for vegetation and desertification monitoring. *Remote Sensing of Environment*, **24**, 297-311.
- DANCETTE, C., 1983, Besoins en eau du mil au Sénégal: Adaptation en zone semi-aride tropicale. *Agronomie Tropicale*, **4**, 267-280.
- EAGLEMAN, J. R., 1971, An experimentally derived model for actual evapotranspiration. *Agricultural Meteorology*, **8**, 385-394.
- FOREST, F., 1984, Simulation du bilan hydrique des cultures pluviales: présentation et utilisation du logiciel BIP-4. IRAT CIRAD DEVE Technical note February 1984, IRAT Division Recherche-Développement Economie-Valorisation de l'Eau. Série DEVE No. 17, Montpellier, France.
- FOREST, F., and KALMS, J. M., 1984, Influence du régime d'alimentation en eau sur la production du riz pluvial: Simulation du bilan hydrique. *Agronomie Tropicale*, **39**, 42-50.
- FRERE, M., and POPOV, G. F., 1979, Agrometeorological crop monitoring and forecasting. Plant protection paper, No. 17, UN/FAO, Rome, Italy.
- HIELKEMA, J. U., PRINCE, S. D., and HASTLE, W. L., 1986, Rainfall and vegetation monitoring in the savanna zone of the Democratic Republic of Sudan using the NOAA Advanced Very High Resolution Radiometer. *International Journal of Remote Sensing*, **7**, 1499-1513.
- HOLBEN, B. N., 1986, Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, **7**, 1417-1434.
- JUSTICE, C. O., TOWNSHEND, J. G. R., HOLBEN, B. N., and TUCKER, C. J., 1985, Analysis of the phenology of global vegetation using meteorological satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, **6**, 1271-1318.
- KERR, Y. H., 1986, NOAA/AVHRR: a unique tool for Earth's resources monitoring. Paper presented at the First Australian AVHRR Conference held in Perth, Australia, in November 1986.
- SCHNEIDER, S. R., MACGINNIS, D. F., and GATLIN, J. A., 1981, Use of NOAA/AVHRR visible and near infra-red data for land remote sensing. NOAA Technical report, NESS 84, Washington, D.C., U.S.A.
- SELLERS, P. J., 1985, Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. *International Journal of Remote Sensing*, **6**, 1335-1372.
- SNLIDERS, T. A., 1986, Interstation correlations and nonstationarity of Burkina Faso rainfall. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **25**, 524-531.
- TUCKER, C. J., and SELLERS, P. J., 1986, Satellite remote sensing of primary production. *International Journal of Remote Sensing*, **7**, 1395-1416.

2.1.3 Indices de végétation et production agricole

Imbernon J., Kerr Y., 1989. Suivi et évaluation des productions agricoles à l'aide des données NOAA AVHRR : Sénégal 1987. *Agronomie Tropicale*, 44 (4) : 327-332

Suivi et évaluation des productions agricoles à l'aide des données NOAA AVHRR : Sénégal 1987

327

J. IMBERNON (1), Y. KERR (2)

RÉSUMÉ — L'apport des données, NOAA/AVHRR dans l'estimation des rendements agricoles est évalué au Sénégal. Il y est mis en évidence l'intérêt de l'indice de végétation IVDN et des synthèses d'images périodiques au cours de la saison de culture 1987. L'accent est mis en particulier sur la cartographie du début de végétation, et le choix du meilleur indicateur de rendements à l'aide de cet indice. L'indice maximum, qui correspond à la période de floraison des cultures, semble le plus explicatif pour estimer les rendements régionaux fournis par le service national des statistiques agricoles. Cette estimation semble pouvoir être améliorée en considérant de plus le taux d'occupation des sols. Enfin, la variabilité intra-zonale des indices est évaluée, et des causes probables en sont avancées.

Mots clés : Télédétection, indices de végétation, NOAA/AVHRR, Sénégal, productions agricoles, systèmes alerte précoce, estimation de rendement, statistiques agricoles.

Il apparaît important ces dernières années au Sahel de se doter de systèmes d'alerte précoce sur les productions agricoles, permettant d'identifier les aires sensibles et d'en évaluer les risques et potentialités. C'est l'objectif de programmes de recherche opérationnelle comme le projet ESPACE (3). Dans ce sens, les données satellitaires offrent l'avantage de la répétitivité temporelle et de la vision spatiale. Ainsi les données NOAA AVHRR (4) sont à l'heure actuelle très utilisées (KERR, 1986), particulièrement pour le suivi des productions herbacées (TUCKER *et al.*, 1985 ; JUSTICE *et al.*, 1986) à l'aide d'indices de végétation.

Ces indices sont en général des combinaisons linéaires de canaux (BARTOUX *et al.*, 1985) destinées à déterminer des indicateurs de croissance végétative (indices foliaires) et à évaluer des récoltes. L'un d'entre eux, l'indice IVDN (5) est très fréquemment utilisé, le plus souvent sous forme de synthèses décennales (HOLBEN, 1986).

Si cet indice donne d'assez bons résultats dans les zones pastorales pour le suivi des biomasses herbacées, son emploi est délicat en zone agricole où, en plus de la variabilité due aux conditions naturelles (sols, climat), on

se trouve confronté à un parcellaire. Or, celui-ci est caractérisé par une grande variabilité de types de cultures (mil, arachide, niébé, maïs...), et de pratiques agricoles (étalement des dates de semis, nombre de sarclages...).

Dans cette étude, nous chercherons à évaluer l'intérêt de cet indice pour un suivi opérationnel des cultures au Sénégal. Nous mettrons en évidence les variabilités intra-zonales, leurs causes probables, et les liaisons statistiques qui peuvent exister avec les données des statistiques agricoles nationales.

Les données

Données NOAA AVHRR. En 1987, nous disposons de 39 images (6) (tableau I) au format HRPT (7), sur une fenêtre 512 × 512 pixels centrée sur le Sénégal, et corrigées géométriquement pour assurer leur superposition.

A chaque date, l'indice IVDN a été calculé en combinant les canaux PIR (0.725-1.1 µm) et R (0.58-0.68 µm) de AVHRR :

$$IVDN = (PIR - R)/(PIR + R)$$

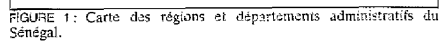
La couverture nuageuse étant importante à cette époque de l'année, nous avons préalablement filtré les nuages en utilisant les canaux visible et infrarouge thermique (HOLBEN, 1986) et en leur appliquant un masque. Puis nous avons réalisé des images de synthèse au pas de temps de 15 jours (imposé par le peu de données disponibles : en mai et juin, le pas est mensuel), en extrayant les valeurs maximales d'indice sur la période correspondante.

TABLEAU I Dates des images AVHRR utilisées.

Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre
10	24	4	1	1	4
29	25	5	3	6	7
30	27	6	10	8	8
	28	13	12	10	
		16	13	15	
		22	20	16	
		23	21	18	
		25	28	20	
			29	26	
			30	28	
				29	

(1) CIRAD IRAT, BP 5035, 34032 Montpellier cedex, France.

(2) Laboratoire d'Etudes et de Recherches en télédétection spatiale, 18 av. E. Belin, 31055 Toulouse cedex, France.



Le découpage administratif et les rendements agricoles sont présentés dans les tableaux II et III.

Régions	Départements étudiés	Surfaces totales (km²)
Haute Casamance	Sédhiou *	7 293
	Kolda *	6 284
	Vélingara	5 434
Nioro	Nioro-du-Rip *	2 277
	Kaolack *	860
	Kaffrine	453
Fatick	Fatick	2 646
	Foundiougne	2 959
	Gossas	2 330
Diourbel	Mbacké	1 833
	Diourbel*	1 175
	Bambey	1 351
Thiès	Mbour	1 607
	Thiès	873
	Tivaouane	1 121
Louga	Kébémer	3 823
	Louga*	5 649
	Linguère*	19 716

* Départements étudiés.

Régions	Rendements (kg/ha)		% Surface cultivée (toutes cultures)
	Mil/sorgho	Arachide	
Saint-Louis	584	651	3,4
Louga	637	956	11,5
Thiès	636	870	48,1
Djourbel	697	1 050	63,3
Fatick	803	1 217	28,5
Kaolack	849	1 192	44,5
Tambacounda	629	1 116	2,7
Kolda	915	1 339	11,8

INDN à Louga

Année	INDN
1950	20
1955	25
1960	30
1965	35
1970	40
1975	120
1980	150
1985	180
1990	120

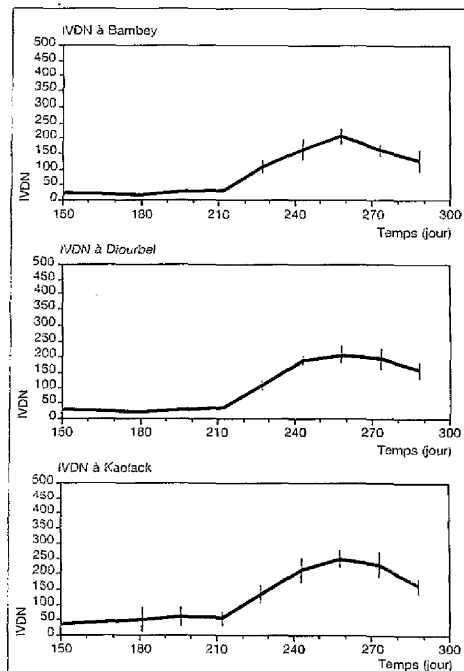
INDN à Linguère

Année	INDN
1950	20
1955	25
1960	30
1965	35
1970	40
1975	100
1980	150
1985	120
1990	100

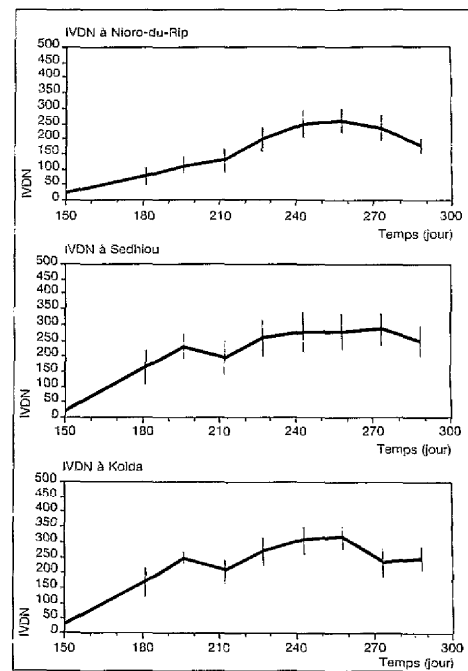
INDN à Kébémér

Année	INDN
1950	20
1955	25
1960	30
1965	35
1970	40
1975	120
1980	180
1985	200
1990	150

FIGURES 2, 3, 4 : Evolution des indices de végétation (et de leur variabilité) au cours de la saison de culture : départements de Louga, Linguère et Kébémér.



FIGURES 5, 6, 7 : Evolution des indices de végétation (et de leur variabilité) au cours de la saison de culture : départements de Bambey, Diourbel et Kaolack.



FIGURES 8, 9, 10 : Evolution des indices de végétation (et de leur variabilité) au cours de la saison de culture : départements de Nioro, Sédhiou et Kolda.

Au sud, la saison est plus précoce : fin mai, avec une installation lente à Nioro-du-Rip, et bien plus rapide à Kolda. On peut constater en juillet un léger flétrissement qui correspond à une baisse du régime pluviométrique (cf. rapport Espace, 1987, documentation interne IRAT).

La durée de la période de végétation est donc une variable zonale, ce qui est une évidence pour les agronomes, mais peut avoir deux intérêts dans l'utilisation de l'indice IVDN :

- cartographier les dates de début de végétation, et mettre ainsi en évidence les zones à démarrage précoce ou tardif ;
- prendre en compte seulement la période végétative dans le calcul des indices intégrés, souvent utilisés pour la prévision des récoltes.

Cartographie du début de la période végétative. De manière arbitraire, nous nous sommes fixés pour critère de démarrage un indice supérieur à deux fois l'indice initial du mois de mai. L'indice du mois de mai variant de 0,025 (sol nu, au nord) à 0,04 (sol nu + couvert arboré, au sud), le seuil de démarrage se situe entre 0,05 et 0,08.

Ce test, réalisé sur toutes les images, nous a permis d'obtenir une image (figure 11) de « dates de début de végétation ». On y observe schématiquement deux zones : au sud et au nord de Kaolack. Mais on observe aussi une poche de démarrage précoce sur les départements de Louga et Linguère et une quasi invariance de la quantité de biomasse de part et d'autre du fleuve Sénégal.

Cette procédure est à rapprocher de la méthode utilisant un seuil de variation de températures de surface dans l'infrarouge thermique (IMBERNON *et al.*, 1987), qui permet de cartographier l'installation de la saison pluvieuse.

Intégration des indices : pour calculer un indice intégré, nous avons considéré la période de mai à octobre (ensemble des données) et la période végétative.

Cet indice est présenté dans le tableau IV en terme de valeurs moyennes : IVDNp sur l'ensemble des données et IVDNv sur la période végétative. Ce dernier est plus élevé du fait de la troncature des faibles valeurs de début.

Valeur maximale de l'indice : les courbes d'évolution de l'indice des figures 2 à 10 comportent un maxi-

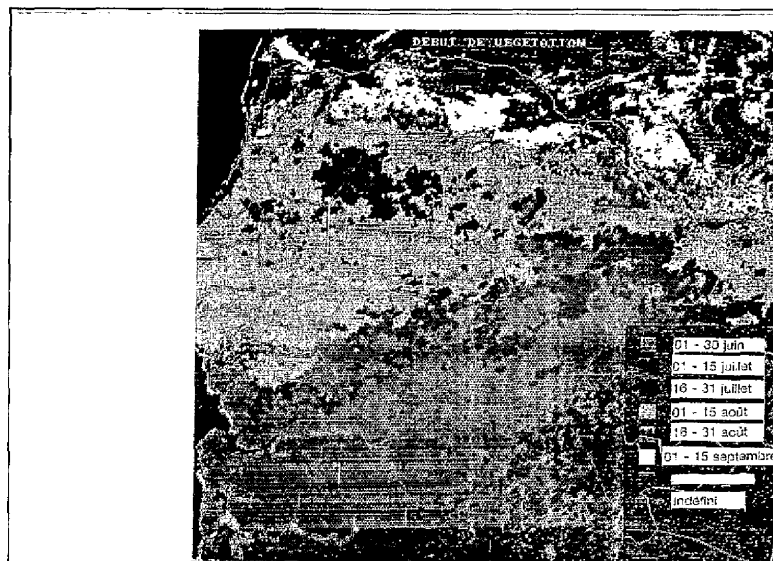


FIGURE 11 : Carte de début de « période végétative » élaborée à l'aide des indices IVDN de AHRR.

TABLEAU IV Indices moyens IVDNp, IVDN et maximaux IVDNm.

Régions	IVDNp	IVDNv	IVDNm
Saint-Louis	4,5	5,7	8,2
Louga	6,0	8,1	11,4
Thiès	5,4	7,3	9,8
Diourbel	5,5	7,5	10,1
Fatick	7,5	9,0	12,7
Kaolack	7,6	8,3	12,1
Tambacounda	8,9	9,9	13,0
Kolda	11,2	11,2	14,8

mum plus ou moins élevé et différencié, suivant les zones. Mais ce maximum apparaît le plus souvent en 2^e quinzaine d'août et 1^{re} quinzaine de septembre. Il correspond à un maximum de végétation verte, mais aussi au stade « floraison » des cultures, stade au cours duquel s'élaborent en grande partie les rendements. Pour prendre en compte cette « période sensible » d'environ 30 jours, nous avons d'abord repéré l'indice maximum, puis calculé un indice moyen IVDNm avec ce maximum et l'indice du pas de temps (tableau IV).

Variabilité intra-zonale des indices : les écarts-types traduisant la variabilité intra-départements des indices IVDN sont représentés pour chaque date sur les figures 2 à 10. La dispersion y est grande, à Linguère et faible à Diourbel. Il semble que la dispersion des indices maximum puisse être liée à la superficie des départements et au taux T_0 d'occupation des sols par les cultures (figures 12 a et 12 b).

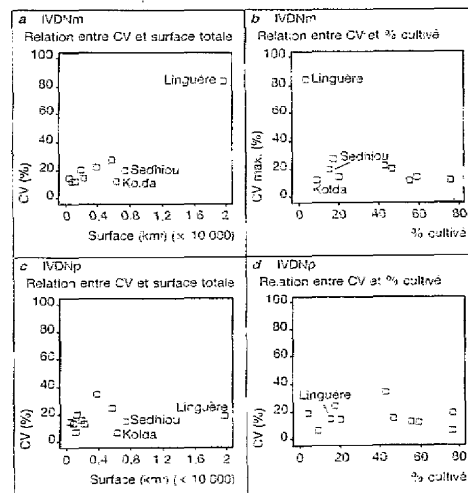


FIGURE 12 a, b, c, d : Dispersion des indices de IVDNp et IVDNm en fonction de la superficie du département et de son taux d'occupation par les cultures.

A Linguère, le coefficient de variation est très élevé et exprime une grande variabilité intra-zonale. Sur ce vaste département (19 716 km²) essentiellement pastoral, les stades phénologiques des pâturages sont probablement

très liés à la variabilité du champ pluviométrique (voir figure 11, « poche » de démarrage précoce). Le maximum de l'indice ne se produit donc pas simultanément sur l'ensemble du département.

A Kolda et Sedhiou, la dispersion est faible bien que les superficies et taux d'occupation du sol soient faibles. Mais dans ce cas, la végétation naturelle est une forêt tropicale relativement dense, dont l'indice est plus stable.

Sur l'ensemble de la saison (mai à octobre), l'indice intégré est pour sa part indépendant de la superficie et du taux T_0 (figures 12c et 12d). Ainsi, dans le cas de Linguère, la dispersion de l'indice est voisine de celle des départements agricoles. A cette échelle de temps, les hétérogénéités intra-saisonnières observées sont lissées.

Indice IVDN et rendements régionaux

Les productions agricoles au Sénégal sont nombreuses, mais deux cultures dominent : arachide d'huile et mil/sorgho, qui représentent respectivement 38 % et 49 % des surfaces cultivées en 1987.

Relier directement l'indice IVDN à la production n'est pas envisageable, car les surfaces cultivées varient fortement d'une année à l'autre, et d'une région à l'autre. Nous avons donc recherché des relations avec les rendements. On peut constater sur les figures 13 et 14 :

- un point singulier pour le mil à Tambacounda : le rendement de 629 kg/ha y est semble-t-il sous-estimé ;
- des relations linéaires pour le mil et l'arachide, avec une pente plus forte dans le cas de l'arachide, l'indice de récolte (rapport grain/matière sèche totale) étant plus élevé.

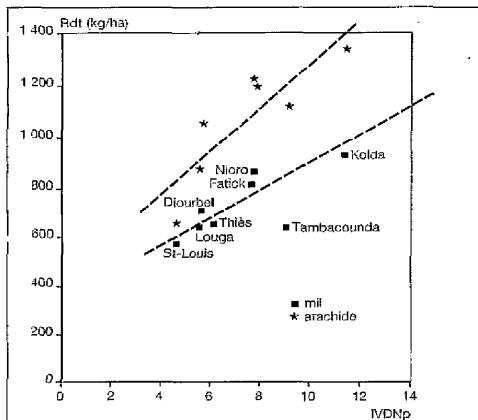


FIGURE 13 : Indices de végétation intégrés et rendements régionaux.

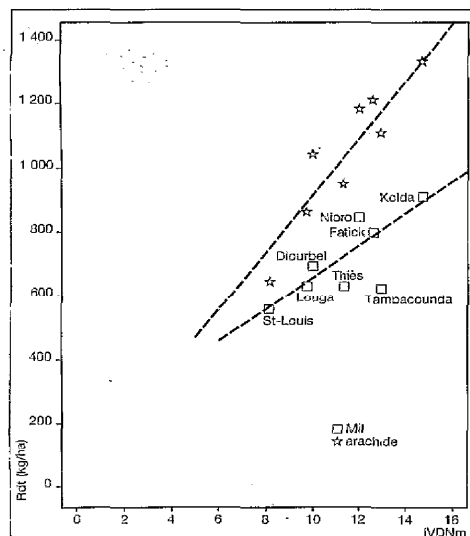


FIGURE 14 : Indices de végétation maximaux IVDNm et rendements régionaux.

Les coefficients de corrélations sont repris dans le tableau V ci-après :

Il semble au vu de ces résultats que l'indice de végétation soit un bon indicateur des rendements régionaux déterminés en 1987 au Sénégal par les services de statistiques agricoles. Dans le cas présent, l'indice maximum semble donner les meilleurs résultats. A un niveau de confiance de 95 %, l'erreur d'estimation par des ajustements linéaires (figures 13 et 14) est respectivement de : ± 58 kg/ha pour le mil, ± 90 kg/ha pour l'arachide.

Conclusion-discussion

Les indices IVDN au Sénégal en 1987, sous forme de synthèses périodiques, ont fait apparaître des liaisons étroites avec les rendements régionaux fournis par le service national des statistiques agricoles. Ceci justifie donc l'intérêt de cet indice pour le suivi des campagnes agricoles.

TABLEAU V Coefficients de détermination r^2 entre les rendements régionaux et les différents indices (* département de Tambacounda non compris).

	IVDNp	IVDNv	IVDNm
Rendement mil	0,54 0,84 *	0,47 0,78 *	0,57 0,83 *
Rendement arachide	0,73	0,79	0,87

Son évolution temporelle renseigne sur le début et la durée de la période végétative. Un simple traitement des données peut ainsi permettre d'élaborer une carte de début de végétation.

L'analyse des indices maximum observés au cours de la saison, à l'échelle des régions administratives, fait apparaître une dispersion liée au taux d'occupation des sols pour la partie centrale du territoire, et au type de couverts naturels : pâturages (Linguère) et forêts (Kolda) par ailleurs.

Dans le choix d'un indicateur des rendements agricoles, l'indice maximum moyen sur une période de 30 jours est apparu le plus explicatif. Il donne en particulier de bons résultats pour la culture d'arachide. Il semble que la qualité des estimations puisse être sensiblement augmentée en considérant de plus le taux d'occupation des sols.

Les relations obtenues ne sont bien entendu pas extrapolables en l'état à d'autres années, a fortiori à d'autres zones écologiques. Elles doivent être validées dans d'autres situations avant tout passage à un mode opérationnel. Mais il apparaît que le choix fait par des programmes tels NOAA/NESDIS/AISC ou AGRHYMET/FAC* de produire et de diffuser des synthèses décennales de l'indice IVDN pourrait rapidement permettre une assez bonne estimation des rendements agricoles au Sahel.

Reçu le 3 octobre 1988.
Accepté le 10 novembre 1988.

(3) Evaluation et suivi des productions agricoles en fonction du climat et de l'environnement.

(4) National Oceanic and Atmospheric Administration-Advanced Very High Resolution Radiometer.

(5) Indice de végétation basé sur la différence normalisée.

(6) Images fournies par le Centre de Suivi Economique (CSE) de Dakar-Sénégal et l'Université de Copenhague - Danemark.

(7) High Resolution Picture Transmission : données pleine résolution (1 km) réceptionnées à la station de Mas Palomas (Canaries).

Références bibliographiques

BARIOUX R., LECAMUS D., LE HENAFF F., 1985. Dossiers télédétection. Indices de végétation. Centre régional de télédétection, université de Rennes II. ISSN 0765-1126. 121 p.

COUREL F., 1983. Analyse des changements biogéophysiques dans le Sahel à partir des mesures des satellites. (Doc. Int. Centre scientifique IBM France).

HOLBEN B.N., 1986. Characteristics of maximum-value composite images from temporal AVHRR data. *Int. J. Remote Sensing*, 7 (11) : 1417-1434.

* Fonds d'Aide et de Coopération.

IMBERNON J., ASSAD E., GUILLLOT B., DAGORNE D., 1987. Evaluation de la pluviométrie par cumul des images infrarouges thermiques METEOSAT. *Veille Climatique Satellitaire*, 16, 49-57.

JUSTICE O.O., HIERNAUX P.H.Y., 1986. Monitoring the grasslands of the Sahel using NOAA AVHRR data. *Niger*, 1983. *Int. J. Remote Sensing* 7 (11) : 1475-1497.

KERR Y.H., 1986. NOAA/AVHRR, unique tool for earth's resources monitoring. *First Australian AVHRR Conference*, Perth Australia, 22-24 octobre 1986, 127-137.

KERR Y.H., IMBERNON J., DEDIEU G., HAUTECEUR O., LAGOUARDE J.-P., SEGUIN B., 1988. NOAA/AVHRR and its use for rainfall and evapotranspiration monitoring. *Int. J. Remote Sensing*.

TUCKER O.J., VANPRAET M.J., SHARMAN A.J., VAN ITTER-SUM J., 1985. Satellite remote sensing of total Herbeaceous Biomass Production in the Senegalese Sahel : 1980-1981. *Remote Sensing of Environment*, n° 17 : 233-245.

TUCKER O.J., JUSTICE O.O., PRINCE S.D., 1986. Monitoring the grasslands of the Sahel 1984-1985. *Int. J. Remote Sensing*, 7 (11) : 1571-1581.

Summary

IMBERNON J., KERR Y. - Follow-up and evaluation of crop production by using NOAA/AVHRR data - Senegal 1987.

The use of NOAA/AVHRR data for estimating crop yields has been tested in Senegal. Results show the interest of the IVDN vegetation index and periodic image syntheses during the 1987 crop season. Main emphasis is on mapping the beginning of vegetation and on the choice of the best yield indicator by using this index. The maximum index corresponding to the crop flowering stage seems to be the most explicative to estimate the regional yields provided by the Agricultural Statistics Service. It seems possible to improve this estimation by taking account also of the land utilization index. Lastly the inter-zonal variability of indices is estimated and their probable causes are put forward.

Key words : Remote sensing, vegetation index, NOAA/AVHRR data, crop production, early warning system, yield estimation, agricultural statistics.

Resumen

IMBERNON J., KERR Y. - Observación y evaluación de las producciones agrícolas por medio de los datos NOAA/AVHRR : Senegal 1987.

En Senegal, se ha evaluado la contribución de los datos NOAA/AVHRR a la estimación de los rendimientos agrícolas. Se señala el interés del índice de vegetación IVDN y de las síntesis de imágenes periódicas durante la temporada de cultivo de 1987. Se hace especial hincapié en la cartografía de principio de vegetación y la selección del mejor indicador de rendimientos gracias a dicho índice. El índice máximo, que corresponde al período de floración de los cultivos, parece ser el más explicativo para estimar los rendimientos regionales que suministra el servicio de estadísticas agrícolas. Parece que se puede mejorar la estimación si se considera, además, el índice de ocupación del suelo. Por último, se evalúa la variabilidad intrazonal de los índices y se emiten causas probables.

Palabras-clave : Percepción remota, índices de vegetación, NOAA/AVHRR, Senegal, producciones agrícolas, sistema alerta precoz, estimación del rendimiento, estadísticas agrícolas.

2.1.4 Pixels mixtes et réponses spectrales

Ouaidrari H., Bégue A., **Imbernon J.**, D'Herbès J.M. 1996. Extraction of the pure spectral response of the landscape components in NOAA-AVHRR mixed pixels. Application to the HAPEX-Sahel degree square. *International Journal of Remote Sensing*, 17 (12) : 2259-2280

INT. J. REMOTE SENSING, 1996, VOL. 17, NO. 12, 2259-2280

Extraction of the pure spectral response of the landscape components in NOAA-AVHRR mixed pixels—application to the HAPEX-Sahel degree square

H. OUAIDRARI†, A. BÉGUÉ‡, J. IMBERNON§

CIRAD-CA, Maison de la Télédétection, 500 rue J. F. Breton,
34 093 Montpellier Cedex 5, France

and J. M. D'HERBES

ORSTOM, Maison de la Télédétection, 500 rue J. F. Breton,
34 093 Montpellier Cedex 5, France

(Received 31 July 1995; in final form 31 January 1996)

Abstract. A method to estimate the pure reflectance of landscape components in mixed pixels is presented in this paper. Based on the usual linear mixture model, this original method allowed us to reconstitute the temporal and spatial variability of the reflectance of the components of a NOAA-AVHRR scene. Ground cover proportions were obtained from a SPOT image classification degraded at NOAA resolution. The signal deconvolution was made using blocks of pixels to limit the errors due to the misregistration between NOAA and the ground cover images. The model was applied to NOAA-AVHRR simulations and to actual NOAA temporal series (1992) over the HAPEX-Sahel degree square, to deconvolute the reflectances of the three landscape components (millet, fallow and plateau). The data analysis indicated a high sensitivity of the method to the misregistration and the need to define an optimal size of pixels which provide a good compromise between the misregistration errors and the spatial variability of the reflectance components. The deconvoluted reflectances were compared to airborne measurements acquired over two sites during the HAPEX-Sahel experiment. The quality of the results depends on the type of landscape. The model performs best on a landscape with small surface units, well spatially distributed.

1. Introduction

Additionally to spatial information, satellite remote sensing provides temporal information on the spectral characteristics of the surface components. Coarse resolution satellites, such as the National Oceanograph and Atmospheric Administration (NOAA) series (1.1 km nadir), provide theoretically one to two images per day. Even for regions with high cloud coverage, this temporal resolution permits correct vegetation monitoring at a regional scale (e.g. Tucker *et al.* 1985, Justice 1986, Malingreau 1986). However, at coarse resolution the size of the ground viewed in an image pixel is generally larger than the size of the surface units. In that case, the image pixel is composed by a mixture of surface components and is generally referred to as a 'mixed pixel', in opposition to a 'pure pixel' composed of a single component. Mixed

† Present address: NASA/GSFC, Code 923, Greenbelt, MD 20771, U.S.A.

‡ Corresponding author.

§ Present address: ICRAF, United Nations Av., PO Box 30677, Nairobi, Kenya.

pixels are a strong limitation for the use of coarse resolution satellite in vegetation monitoring. In effect, it is important to be able to isolate the spectral characteristics of a particular canopy either to detect directly any climatic accident by analysing change in the seasonal shape, or to derive biophysical parameters to be used in primary production modelling.

In some cases, the problem of mixed pixel can be dodged. Guérif *et al.* (1991) used SPOT images classification over Algeria to detect NOAA pixels where cereals are dominant. The seasonal response of these selected pixels was then used in a model of biomass and yield estimation. Disregarding the particular feature of the landscape, the representativity of the selected pixels for the whole scene is not straight forward.

Generally, mixing problems are treated in remote sensing by linear mixture modelling. It is a simple mathematical description of the generation of a mixture signal, and seems to be appropriate for many land-based scenes. At coarse resolution, the linear mixture model is often used to estimate the ground cover proportions provided the spectral response of the components obtained from NOAA training pixels (e.g., Quarmby *et al.* 1992), principal components feature space (e.g., Cross *et al.* 1991), laboratory measurements (e.g., Smith *et al.* 1987) or high resolution images calibrated by linear regression (e.g., Holben and Shimabukuro 1993, Kerdiles and Grondona 1995). Few people have used it to estimate the spectral response of the components providing the ground cover proportions (Hanan *et al.* 1991).

In the south-west of France, where the landscape is a patchwork of small size fields, Puyou-Lascassies *et al.* (1994) realized a theoretical study on coarse resolution signal deconvolution in order to establish eight profiles of vegetation indices. Land use data came from SPOT and Landsat image classification, and coarse resolution data (1.21 km²) were obtained by degradation of those same high spatial resolution images. The linear mixing model was solved by multiple linear regression over the whole image. This method gives very good results, but seems to be very sensitive to the misregistration between the classification and the coarse resolution images (personal communication). This statistical method has been applied successfully on actual NOAA-Advanced Very High Resolution Radiometer (AVHRR) time series over Yatenga province in Burkina-Faso (Cherchali and Flouzat 1994) and over the First International Satellite Land Surface Climatology Project (ISLSCP) Field Experiment (FIFE) site in Kansas (Oleson *et al.* 1995). Unfortunately no details are given in these studies on the sensitivity of the method to the misregistration between NOAA images and the land cover classifications issued from high-resolution satellite images.

Fischer (1994) developed a semi-empirical model to represent the temporal variations of a vegetation index, based on the use of a double logistic function (five parameters) to describe the temporal evolution of the vegetation index of a pure crop. The model parameters are then retrieved through a nonlinear least square fitting. This method has been applied to AVHRR data over the Beauce region (France), and provides good profiles of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for the winter and summer crops. This method is adapted to time differentiated crops having a regular growth.

These examples show that the mixed pixel problem is treated differently according to the landscape. In semi-arid regions, the size of the fields, the high variability of the spectral characteristics of a crop at a regional scale, a short growing season and the risk of climatic accident throughout the growing period prevent the use of most of the existing methods. A new methodology based on linear mixture modelling and

adapted to semi-arid regions is therefore proposed in this paper. This methodology takes into account, and tends to reconstitute, the spatial variability of the reflectance of the landscape components.

This study takes advantage of the HAPEX-Sahel experiment at (Goutorbe *et al.* 1994) results. The study area, a 1° by 1° square centred on Niamey (Niger), has been classified from SPOT imagery to produce a soil surface conditions map. This map provides information on the ground cover of the main components of the landscape. In this paper, the study area is first presented, and the linear mixture model and its application to NOAA images is described. Pure reflectance of the components is then extracted from 1992 NOAA-AVHRR images of the degree square, and compared to airborne radiometric measurements performed over 2 HAPEX-Sahel sites throughout the growing season.

2. Study area and ground data

2.1. HAPEX-Sahel degree square

HAPEX-Sahel (Hydrologic Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel) took place in Niger (West Africa) during 1991–1992, in order to improve the parameterization of land surface atmosphere interactions at the General Circulation Model (GCM) grid-box scale (Goutorbe *et al.* 1994). The experiment was based on a 1° by 1° square (2–3° E, 13–14° N), that contains Niamey (figure 1).

Mean rainfall at Niamey is about 560 mm (1905–1989), with a north to south gradient of about 1 mm km⁻¹ (Lebel *et al.* 1992). The rainy season is generally from June to September.

The area contains reasonable examples of the more widespread surfaces that can be found in the Sahel (Prince *et al.* 1995). There are three main vegetation types: arable crops (almost entirely millet), fallow savannah and tiger-bush. The areas of millet (*Pennisetum glaucum* (L.) R.Br.) are sown in clumps at the beginning of the rainy season. The fallow savannah contains diverse mixtures of naturally occurring perennial woody shrubs (*Guiera senegalensis* (L.) is dominant over the degree square) and herbaceous annual plants. The tiger-bush only occurs on the laterite plateaux, and is made of dense strips of vegetation (trees) separated by areas of completely bare soil. According to the rainfall, the density of the vegetation decreases from south to north.

2.2. Vegetation map

A map of soil surface conditions of the HAPEX-Sahel degree square has been made from a supervised classification of a mosaic of 6 SPOT images taken on 24 October 1988 (d'Herbes *et al.* 1992). This cartography includes geomorphological, vegetation, pedological and hydrological features of the landscape. It results in a 12 classes map, whose legend is given in table 1.

In order to reduce the information to a vegetation map, the original 12 classes have been reduced to three classes whose correspondances are given in table 1 (Prince *et al.* 1995):

- The 'plateau' class regroups the plateaux, the sand covered plateaux and the plateau edges. It represents about 21 per cent of the degree square area.
- The 'millet' class regroups the agriculture lands and half of the agro-pastoral lands. This class covers about 52 per cent of the area.

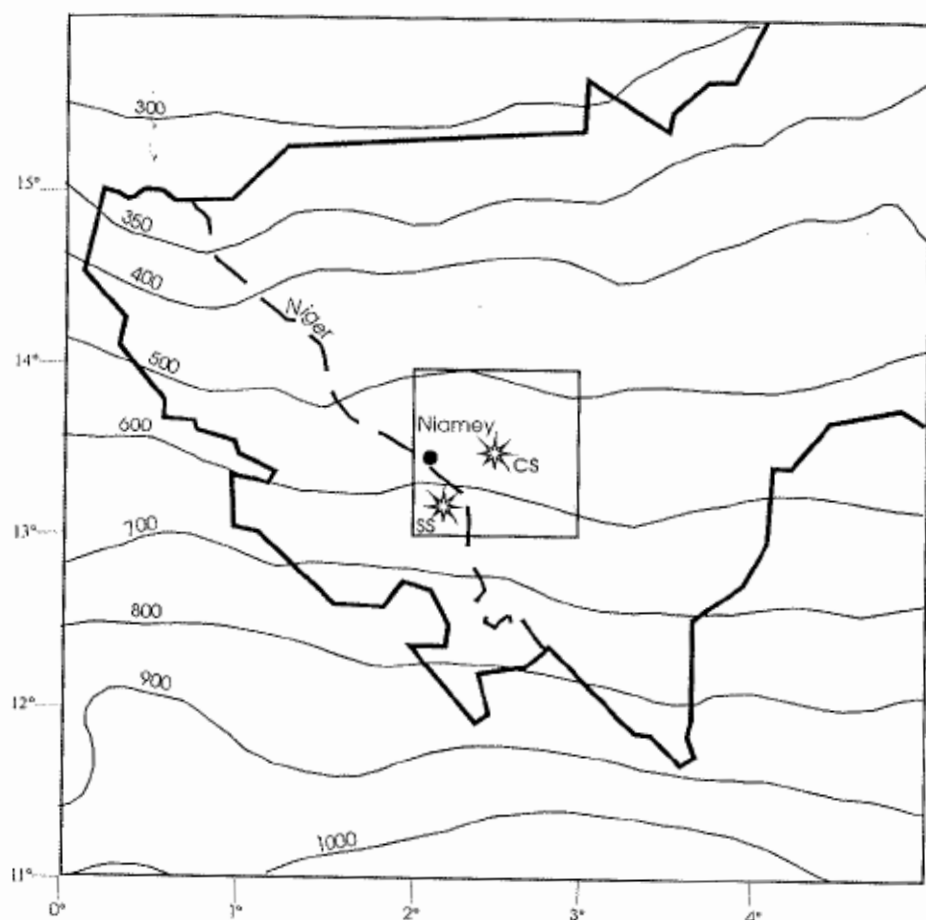


Figure 1. Location of the HAPEX-Sahel degree square in Western Niger and location of the Central (CS) and South (SS) sites. The isohyets represent the mean annual rainfall on the 1951-1980 period (AGRHMET 1992).

- The 'fallow' class regroups the fallow lands, half of the agro-pastoral lands and the dry forests. This class covers about 27 per cent of the area.

The resulting three classes map is shown in figure 2.

2.3. Radiometric measurements

Three supersites were identified inside the HAPEX-Sahel degree square, each approximately 20 km × 20 km (figure 1). The two central supersites are made of small size plateau separated by agro-pastoral areas, while the Southern supersite is composed of a large size plateau, north-south oriented. During the 1992 field experiment, measurements of surface reflectances in the visible and near-infrared have been made from low altitude light aircraft transects over these supersites (Hanan *et al.* 1996). Radiances were measured in the Thematic Mapper bands (TM3: 630-690 nm and TM4: 760-900 nm) with an Exotech 100AX radiometer at nadir. The nominal field of view of the radiometer was 52.7 m diameter. The measurements were generally

Table 1. The legend of the spatio-map of the soil surface conditions (d'Herbes *et al.* 1992) and land units of the HAPEX-Sahel degree square.

Original class	Dominant characteristic	Vegetation cover	Principal land use	Area (ha)	Grouping class*
1	Plateau edge	None-low	Sylvo-pastoral	16 170	P
2	Plateau	None	None	54 590	P
3	Plateau	None	None	92 320	P
4	Sand covered plateau	None-low	Agro-sylvo-pastoral	90 280	P
5	Azonal	—	Agriculture and urban	128 200	M
6	Aeolian sand	Medium-dense	Fallow	63 300	F
7	Azonal	Dense	Forest and rice	70 370	F
8	Aeolian sand	None-medium	Agro-pastoral	185 420	0.5 M + 0.5 F
9	Aeolian sand	None-low	Agriculture	155 920	M
10	Valley bottoms, sandy plains	None-medium	Agro-pastoral	235 000	0.5 M + 0.5 F
11	Azonal	Low-medium	Agro-pastoral	88 600	0.5 M + 0.5 F
12	Open water	—	—	6 100	—

*P for plateau, M for millet and F for fallow.

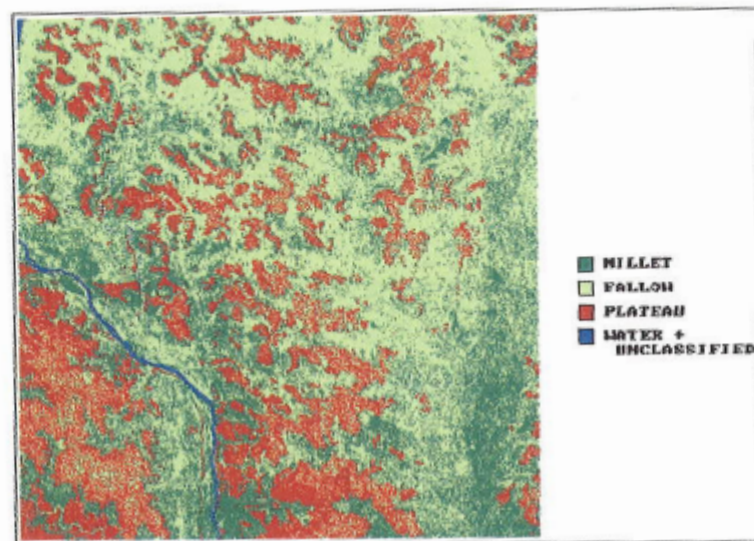


Figure 2.

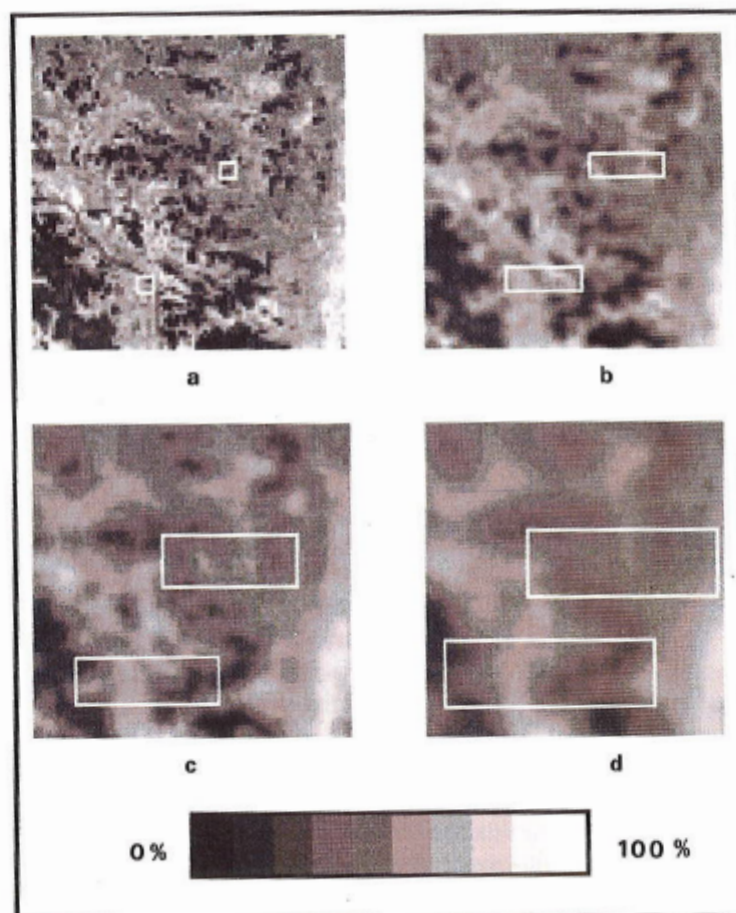


Figure 5.

made in the morning, around 10 am. During aircraft measurements, incident visible and near-infrared radiation were continuously measured in the fields using another Exotech radiometer viewing a calibrated reflectance panel. These data were used to estimate surface reflectances from the aircraft measured surface radiances.

To test the deconvolution method proposed in this paper, two sites have been selected (figure 1). One is located within the West-Central supersite ($13^{\circ} 30' \text{N}$ – $2^{\circ} 28' \text{E}$), the other is located within the Southern supersite ($13^{\circ} 11' \text{N}$ – $2^{\circ} 19' \text{E}$). These sites are referred to in this paper as the Central site (CS) and the South site (SS) respectively.

3. Method

3.1. Linear mixture model

The basic physical assumption underlying the linear mixing model is that there is no significant amount of multiple scattering between the different cover types, so that the signal measured by a sensor can be considered as the sum of the signals received from each cover component weighted by their respective area. Under these conditions and for a given spectral band, the expected reflectance value R of a mixed pixel made of n ground cover components is

$$R = \sum_{i=1}^n P_i \rho_i \quad (1)$$

where P_i is the proportion of surface area of the components i and ρ_i is the mean reflectance of the component i .

The linear mixture seems to be a good assumption at the scale of the Sahelian landscapes since the different cover types are large enough not to interfere. Our methodology is based on the linear mixture.

3.2. Mixing system

To have a unique set of solutions (ρ_i), the number of linear equations must be equal to the number of unknowns n . These n equations will be referred to as the mixing system:

$$\left. \begin{aligned} R_1 &= P_{11}\rho_1 + P_{21}\rho_2 + \dots + P_{n1}\rho_n \\ R_2 &= P_{12}\rho_1 + P_{22}\rho_2 + \dots + P_{n2}\rho_n \\ &\vdots \\ R_n &= P_{1n}\rho_1 + P_{2n}\rho_2 + \dots + P_{nn}\rho_n \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

In our case, as there are three unknowns (the reflectance of millet, the reflectance of fallow and the reflectance of plateau) the mixing system must be composed of three equations ($n=3$).

Figure 2. SPOT image classification of the HAPEX-Sahel degree square (from d'Herbes *et al.* 1992).

Figure 5. Millet fraction images calculated at four spatial resolutions: (a) NOAA resolution, (b) 3×3 pixels blocks, (c) 6×6 pixels blocks and (d) 9×9 pixels blocks. In (a), white squares indicate the location of the sites, and in (b), (c), (d), white lines delineate the influence zones of the Central and South sites.

3.3. Solving the mixing systems

In the mixing system equation (3), R represent the reflectances of a NOAA pixel made up of up to three different ground cover components. Unfortunately, the proportions of these components cannot be accurately defined at the NOAA pixel scale, because of problems of misregistration between the vegetation map and NOAA images. Therefore, we chose to solve the mixing system on blocks of pixels rather than on single pixels. The blocks are square and of reflectance equal to the mean reflectance of the pixels inside the block. The choice of the blocks size is a key point in the methodology, and will be discussed later.

Additionally to the size of the blocks, the location of the three blocks of the mixing system is important. Their spatial orientation must be driven by the gradient of the satellite image, if one exists. For instance, in our case, there is a north-south gradient in reflectances due to the gradient of rainfall. The mixing system resolution is then carried out preferentially east-west, in the direction where the radiometry of a component is likely to be homogeneous. The juxtaposition of the three blocks is referred to hereafter as a 'window' (figure 3).

The mixing system is first solved on the three blocks of a window located at the left-top corner of the image. The window is then shifted one column forward, and a new system is solved. This procedure is iterated up to the right border of the image. Then the window is shifted one line forward from the left-top corner and a new system is solved. The window is then shifted one column forward and so on, until the whole image has been explored by the sliding window. Each mixing system provides a set of reflectance for the three classes. There are about as many sets of solutions as number of pixels in the image.

During this process, each pixel participates to several mixing systems (figure 3). The number N of these system, equivalent to the number N of the windows sharing a common pixel, is the product between the number of columns (equal to the size of three blocks) and the number of lines (equal to the size of one block) shifted around this pixel, and is equal to $(3b^2)$, with b the size of the side of the square blocks expressed in pixels and referred hereafter as 'block size'. The number of mixing systems as function of the block size is plotted in figure 4.

The part of the image explored by the windows sharing a given pixel is referred to hereafter as the 'influence zone' of the pixel (figure 3). The influence zone is not square due to the juxtaposition of the three blocks. Its east-west size is $(6b-1)$ pixels and its north-south size is $(2b-1)$ pixels (figure 4).

As seen previously, each mixing system provides a set of three reflectances, one for each class. So, for a given pixel, the N mixing systems produce theoretically N sets of reflectances. The 'pure' reflectance of the components of such a pixel is calculated as the average of these N reflectances (figure 3). This technique also allows for the estimation of the variability of those reflectances through the value of the ratio between the mean square error and the mean reflectance of the component.

4. Sensitivity analysis on NOAA simulations

The size of the blocks must be a compromise between the misregistration of the map and the satellite image, and the variability of the reflectance of the components over the satellite image. In effect, large blocks will decrease the sensitivity of the method to the misregistration, but will probably increase the reflectance variability inside the blocks resulting in incorrect mixing systems. To study the sensitivity of the method to the block size and to the misregistration, a sensitivity analysis is made

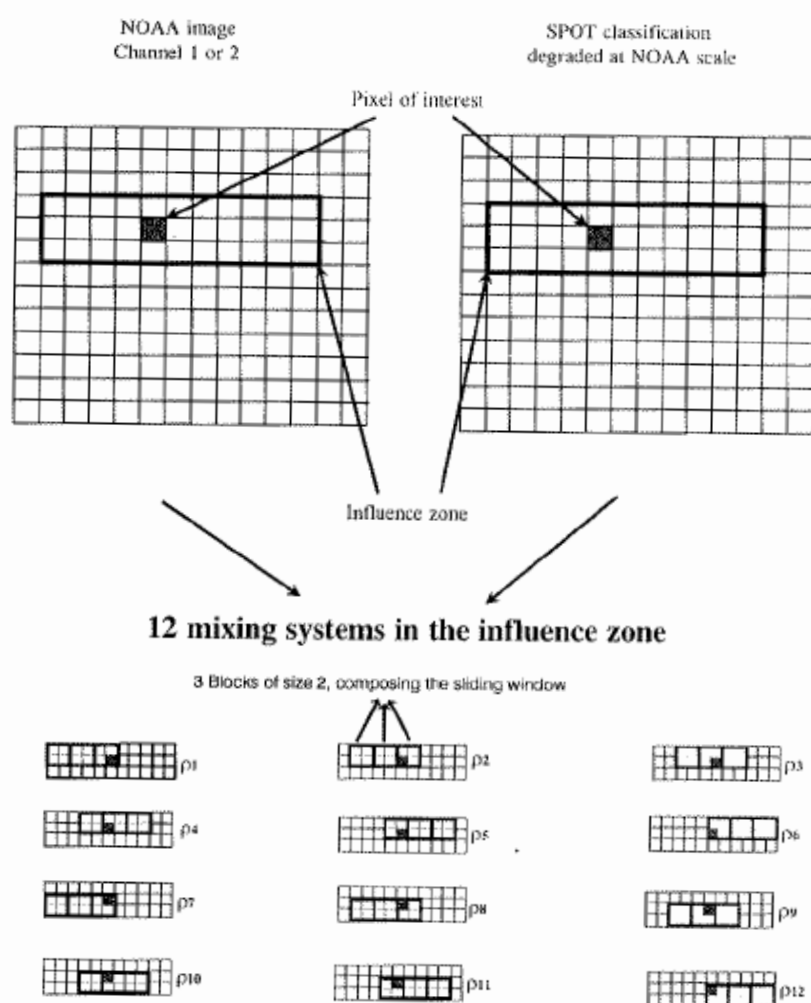


Figure 3. Sketch of the mixing system, for $b=2$. For a given component, and a given pixel—
Mean reflectance: $\rho = 1/12 \sum_{i=1}^{12} \rho_i$, Variance: $\text{Var} = 1/12 \sum_{i=1}^{12} (\rho_i - \rho)^2$.

on simulated coarse resolution images, where the radiometry of the mixture component is taken homogeneously over the study area. The reversibility of the model is then tested on two sites (the central and south sites) and discussed according to two criteria: the number of accepted solutions and the error committed on the calculated pure reflectance of the landscape components.

4.1. Simulation of coarse resolution images

Simulation of the reflectance of the coarse resolution pixel is obtained by linear mixture modelling:

- The proportions of the components are given by the fraction images obtained by degradation of the vegetation map at NOAA resolution (Justice *et al.* 1989). The millet fraction image is given in figure 5(a).

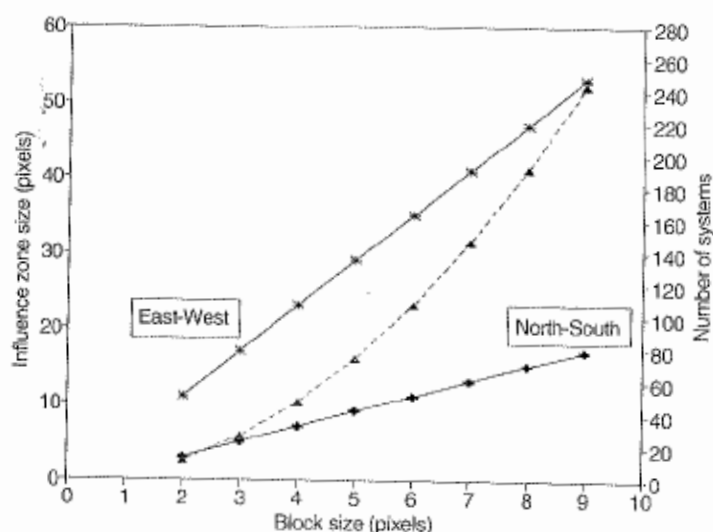


Figure 4. Sizes of the influence zone (solid lines) and number of mixing systems (dashed line), as function of the block size.

- The reflectances of the components are derived from near-infrared measurements made over the central site in the middle of the rainy season (Hanan *et al.* 1996): 0.5, 0.4 and 0.3 roughly for the millet, fallow and plateau respectively.

To study the sensitivity of the method to the block size, the NOAA fraction images are degraded at eight spatial resolutions (from 2×2 to 9×9 NOAA pixels). The example of the millet fraction images at different resolutions are given in figures 5(a)–(d). On these figures, the corresponding influence zones of the Central and South sites are delineated.

To study the sensitivity of the method to the misregistration, three geometric misregistrations are simulated by shifting forward 1, 2 or 3 columns of the fraction images.

4.2. Number of accepted solutions

As seen previously, N mixing systems give theoretically N sets of reflectances. In practice, only the solutions with reflectances within the zero one interval are accepted and used to calculate the pure reflectance of the components. The mixing systems can give impossible solutions either if the equations are identical or if the fractions of components are false. In the case of a natural landscape, with no geometrical pattern, the equations are unlikely to be identical. This is illustrated by the 100 per cent of accepted solutions on the Central and South sites when there is no misregistration (figure 6). The rejected solutions are only due to false cover proportions.

The modification in ground cover easily explains why the proportion of accepted solutions decreases with the number of misregistered pixels and increases with the size of the blocks (figure 6). In effect, a given shift of columns will less affect the components proportions within the area of a large block of pixels than within the area of a small one. For block size smaller than 4, the number of accepted solutions

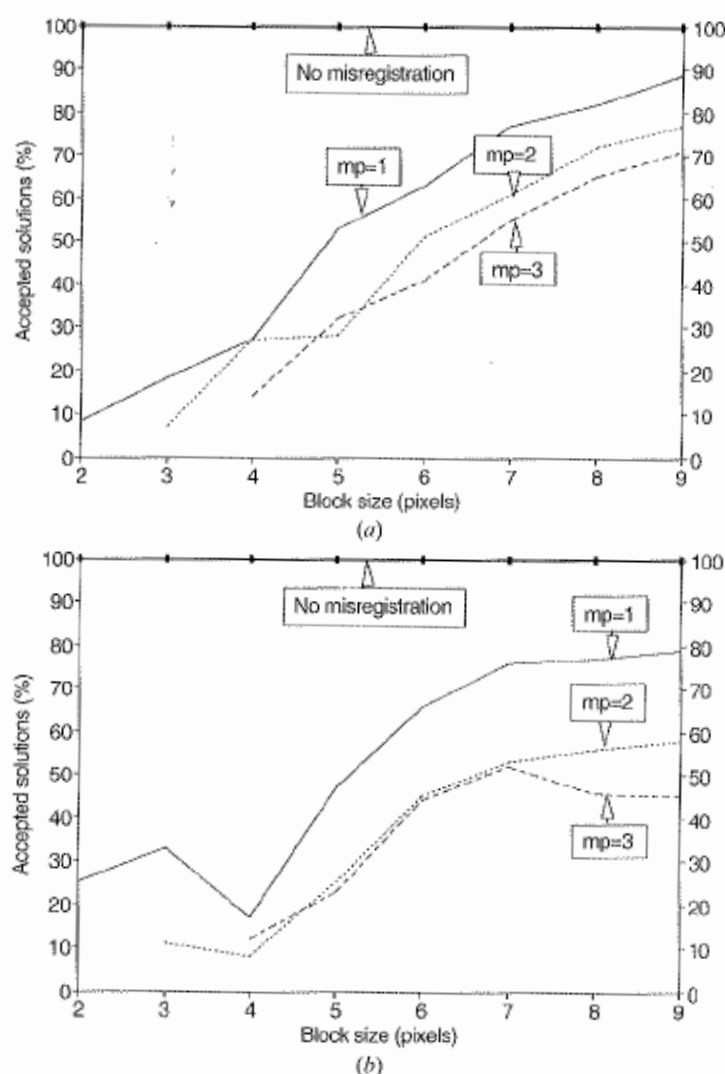


Figure 6. Proportions of accepted solutions of the mixing systems in function of the block size and the number of misregistered pixels (mp) for (a) the Central site, and (b) the South site.

corresponds to less than nine mixing systems and therefore will not be considered in the following discussion.

The differences between CS (figure 6(a)) and SS (figure 6(b)) are rich in information. The proportion of accepted solutions of CS increases almost monotonically with the size of the blocks (up to 90 per cent of accepted solutions for one misregistered pixel and above 70 per cent for more misregistration), while for SS this proportion is almost stationary for block sizes above seven pixels and reaches only 80 per cent for one misregistered pixel and less than 60 per cent for more misregistration. These differences can be explained by the landscape pattern inside the influence zones of the sites (figure 7). On CS (figure 7(a)), the proportion of fallow is constant whatever

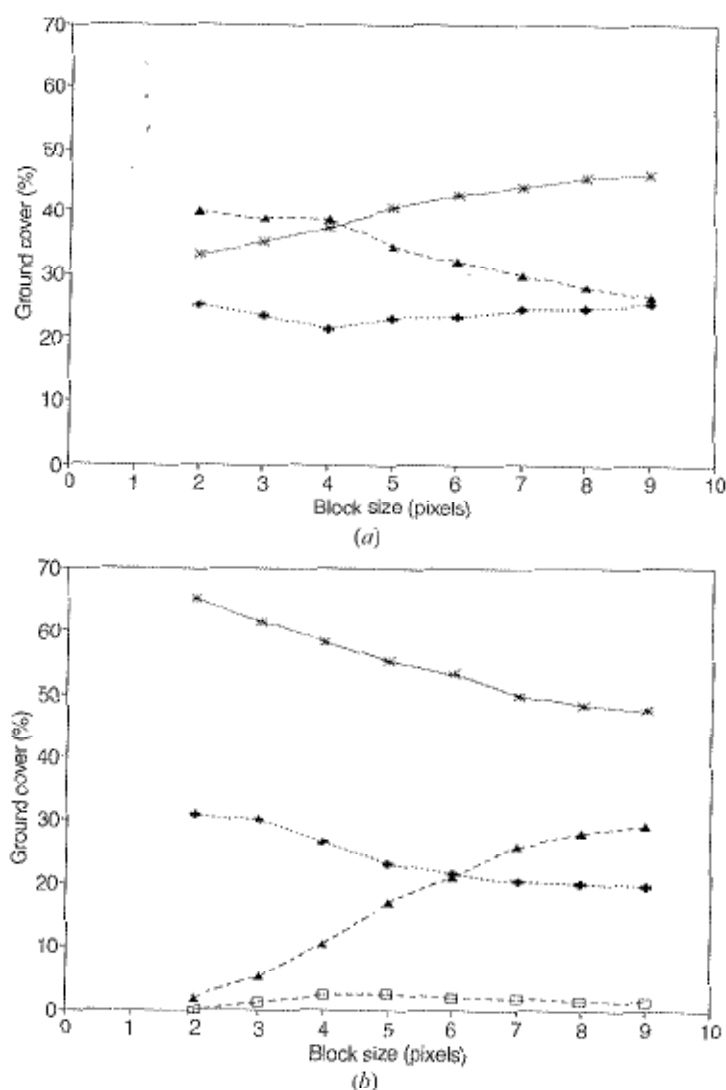


Figure 7. Proportions of millet (solid line), fallow (dotted line), plateau (dashed line) and unclassified (square symbols) pixels as function of the block size, in the influence zone of (a) Central, and (b) South sites.

the block size (around 25 per cent), and the proportions of millet and plateau varies a little (around 10 per cent of change between a block size of 2–9). Additionally to small changes in proportions, the landscape units are relatively small and spatially well distributed (figure 5). In that case, a shift of column does not modify dramatically the composition of the landscape, and the number of accepted solutions is acceptable. On SS (figure 7(b)), the proportions of the components change a lot with the block size, as illustrated by the proportion of plateau almost zero at small block sizes and reaching 30 per cent at a block size of 9. With the increase of block size, the influence

zone of SS includes large and contrasted units of plateau which makes the mixing systems more sensitive to the misregistration.

4.3. Error on the calculated pure reflectance

Table 2 presents the errors made on the calculated pure reflectance of CS and SS landscape components. This error is the difference between calculated and theoretical reflectances, normalized by the theoretical reflectance (constant over the whole image, for memory). It is a good indicator of the sensitivity of the methodology to the misregistration and the size of the blocks. As expected, the errors tend to decrease with the size of the blocks and to increase with the number of misregistered pixels. On CS, the calculated reflectances are in the same range than theoretical reflectances for one pixel of misregistration. For higher misregistration, the response of the millet and the fallow are not correctly restituted. On SS, there is a slight confusion between millet and fallow. This result must be related to the previous conclusions on the number of accepted solutions.

Table 2. Relative error (%) on the calculated pure reflectance of the Central and South sites landscapes components, in function of the block size and the number of misregistered columns.

Site			Block sizes b (pixels)					
			4	5	6	7	8	9
Central site	Millet	0*	0	0	0	0	0	0
		1	8	10	2	8	6	6
		2	28	18	4	12	8	6
		3	18	22	26	14	14	10
	Fallow	0	0	0	0	0	0	0
		1	5	18	5	10	13	8
		2	13	25	18	18	18	15
		3	13	33	30	23	25	18
	Plateau	0	0	0	0	0	0	0
		1	10	3	3	0	0	0
		2	33	13	10	3	3	3
		3	50	13	23	7	3	7
South site	Millet	0	0	0	0	0	0	0
		1	18	14	12	14	8	6
		2	18	12	18	14	14	8
		3	8	14	20	18	16	10
	Fallow	0	0	0	0	0	0	0
		1	28	28	23	25	15	15
		2	23	15	23	18	23	18
		3	8	18	28	20	20	13
	Plateau	0	0	0	0	0	0	0
		1	20	10	7	7	3	0
		2	20	10	13	13	10	3
		3	7	10	17	19	13	10

* Number of misregistered columns.

Another indicator of the sensitivity of the method is the coefficient of variation of the calculated reflectances. Figure 8 gives the results for one column of misregistration. Again, the general trend is a decrease with the size of the blocks, except for the fallow and the plateau of site SS which display a minimum at a block size of seven. The coefficient of variation is not very sensitive to the misregistration (table 3). This could be explained by the fact that the mixing systems with large errors in ground cover have been eliminated by the test on the calculated reflectances.

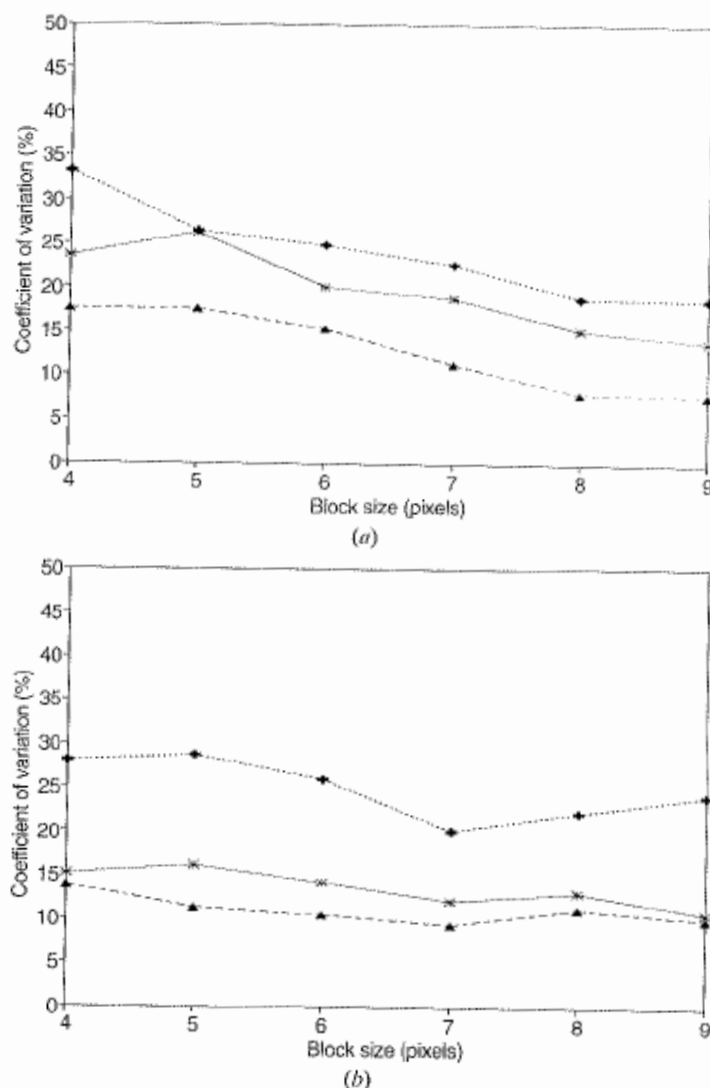


Figure 8. Coefficient of variation of the simulated near-infrared reflectances of millet (solid line), fallow (dotted line), and plateau (dashed line) components as function of the block size. Calculations were made for one column of misregistration, on the (a) Central, and (b) South sites.

Table 3. Variation coefficient (%) of the calculated pure reflectance of the Central and South sites landscapes components, in function of the block size and the number of misregistered columns.

Site			Block sizes b (pixels)					
			4	5	6	7	8	9
Central site	Millet	1*	24	26	20	19	15	14
		2	17	23	20	19	12	14
		3	11	29	24	21	19	21
	Fallow	1	33	26	25	23	19	19
		2	34	17	26	21	21	21
		3	34	22	23	22	20	25
	Plateau	1	17	17	15	11	8	8
		2	11	17	16	14	11	10
		3	15	20	21	14	13	12
South site	Millet	1	15	16	14	12	13	11
		2	21	17	14	18	17	14
		3	16	18	14	21	18	16
	Fallow	1	28	29	26	20	22	24
		2	16	29	24	23	26	27
		3	34	28	22	23	25	29
	Plateau	1	14	11	10	9	11	10
		2	22	12	10	13	14	13
		3	14	13	10	13	15	14

* Number of misregistered columns.

5. Application to NOAA images

5.1. NOAA data

A total of 167 NOAA-AVHRR LAC images were obtained for the 1992 growing season (from 1 May to 25 October), for the area between latitude 11° and 16° N and longitude 0° and 5° E, centred around Niamey. All the images were mapped in a Plate Carrée projection. For each image, channels 1 (0.58–0.68 μm) and 2 (0.725–1.1 μm) were calibrated and atmospherically corrected (Quaidrari *et al.* 1994). Unfortunately, the cloudiness is very important during this period, and only 16 clear images of the HAPEX-Sahel degree square have been retained for the whole growing season: Julian days 139, 163, 173, 174, 183, 190, 232, 239, 247, 262, 266, 271, 272, 287, 295, and 299. This temporal series is very irregular, and shows a gap of data in the middle of the growing season (between Julian days 190 and 232).

5.2. Method

The geometric registration between NOAA images and the vegetation map is made in three steps:

- Spatial degradation of the vegetation map at NOAA resolution (*cf* previous section).
- Autocorrelation between NOAA images and the vegetation map to identify the HAPEX-Sahel degree square on the NOAA images.
- Second-order polynomial geometric correction using ground control points (Niger River, plateau ...) identified on NOAA and the degraded vegetation map.

Once both images have been registered, one question remains: what is the optimal size of the blocks to take into account not only the misregistration between NOAA and the vegetation map (which has been studied previously), but also the heterogeneity of the radiometry of the components over the degree square? To answer this question, a second sensitivity analysis on the size of the blocks is done in real conditions. The results are illustrated by the coefficient of variation of the near-infrared reflectance of the components of CS and SS, on Julian day 262 (figure 9). On both sites, the coefficients of variation decrease down to a value of seven pixels of block size, and then increase slightly. That increase, not observed on the simulation,

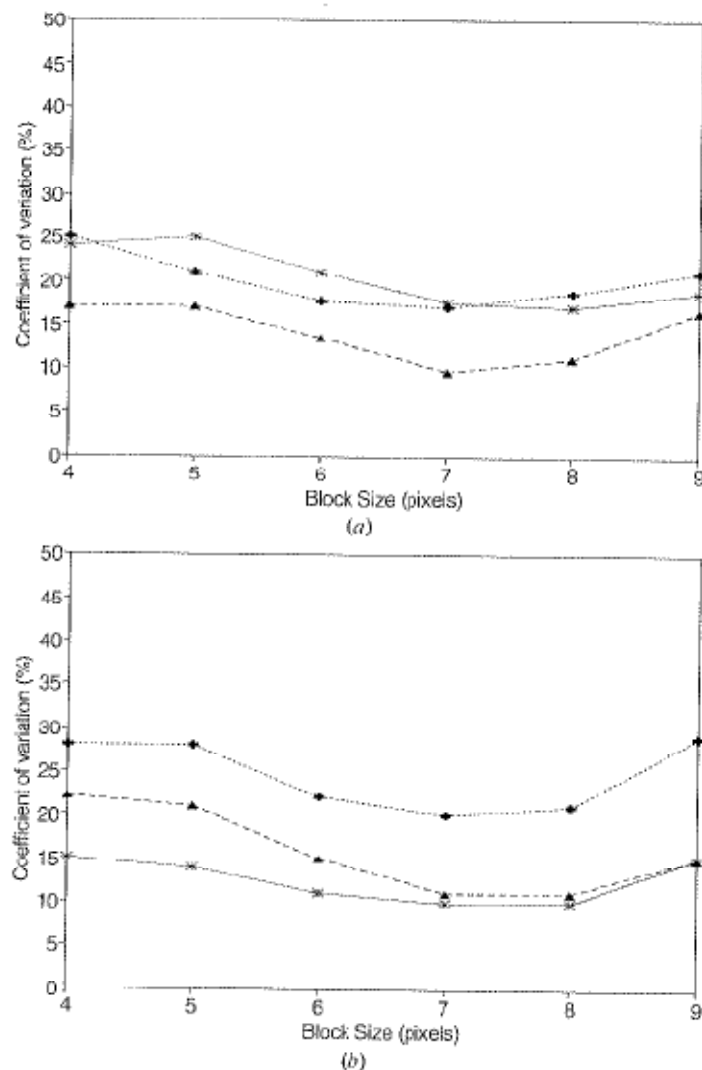


Figure 9. Coefficient of variation of the estimated near-infrared reflectances of millet (solid line), fallow (dotted line), and plateau (dashed line) components as function of the block size. Calculations were made for Julian day 262, on (a) Central, and (b) South sites.

can be explained by the variability of the spectral characteristics of a crop within a block. As the coefficient of variation is the only indicator on the 'quality' of the inversion, a mean block size of seven pixels has been chosen to inverse the mixture model over the satellite image.

5.3. Results and discussion

The previous methodology of signal deconvolution was applied to the 16 NOAA images. The seasonal profiles of the coefficient of variation calculated on CS and SS are presented for the millet in figures 10(a) and (b) respectively. The other components

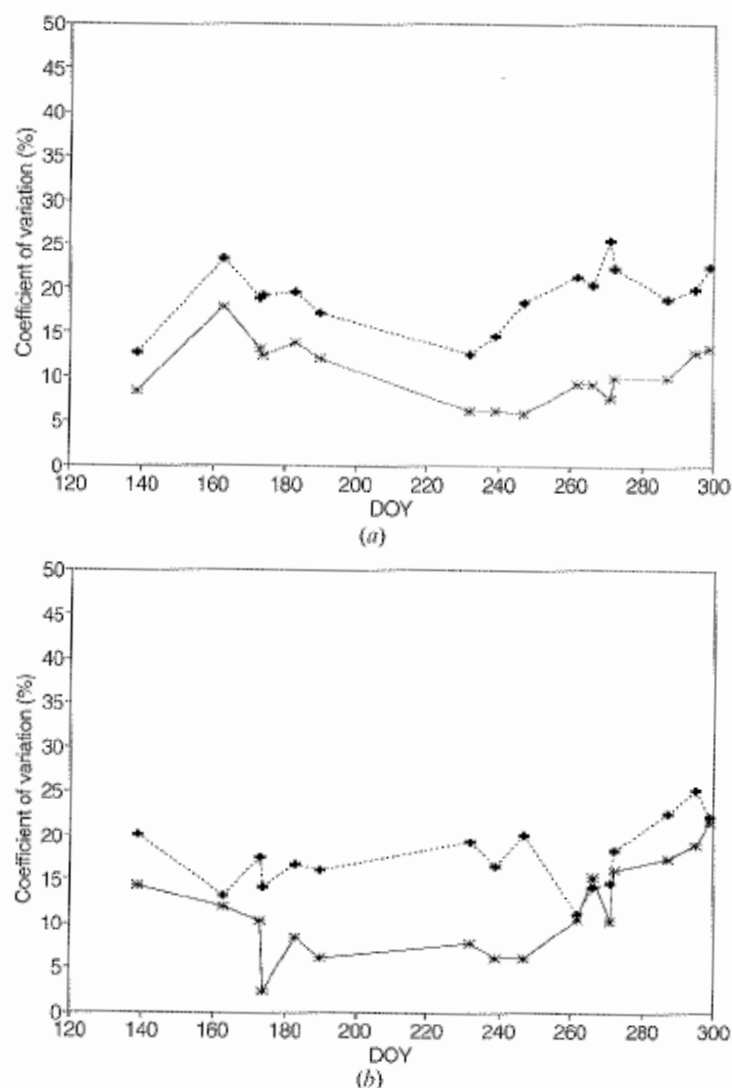


Figure 10. Coefficient of variation of millet red (solid line) and near-infrared (dotted line) reflectances throughout the growing season. Calculations were made with a block size of 7 pixels on the (a) Central, and (b) South sites.

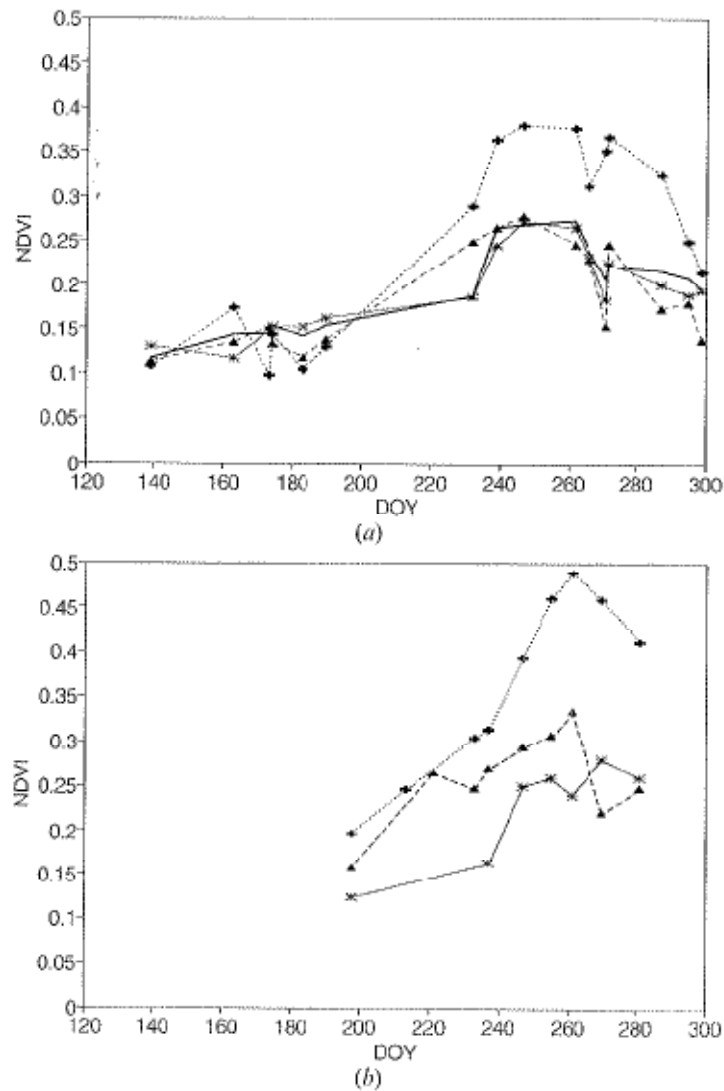


Figure 11. Central site NDVI profile of the millet (solid line), fallow (dotted line), and plateau (dashed line) components obtained from (a) deconvolution of the AVHRR signal, and (b) air-borne measurements. In (a) the bold line corresponds to the NDVI profile of the mixed AVHRR pixels.

have about the same profiles. The general trend is that the coefficients display a minimum in the middle of the growing season. Furthermore, at the beginning of the season, the coefficients of variation are smaller on SS than on CS. This could be explained by the rainfall regime, earlier on SS than on CS (Taupin *et al.* 1993), resulting in more homogeneous growth of the vegetation canopies. The coefficient of variation in the red channel is rather low (between 0 and 10 per cent in the middle of the rainy season), less than in the near-infrared channel (between 10 and 20 per cent at the same period).

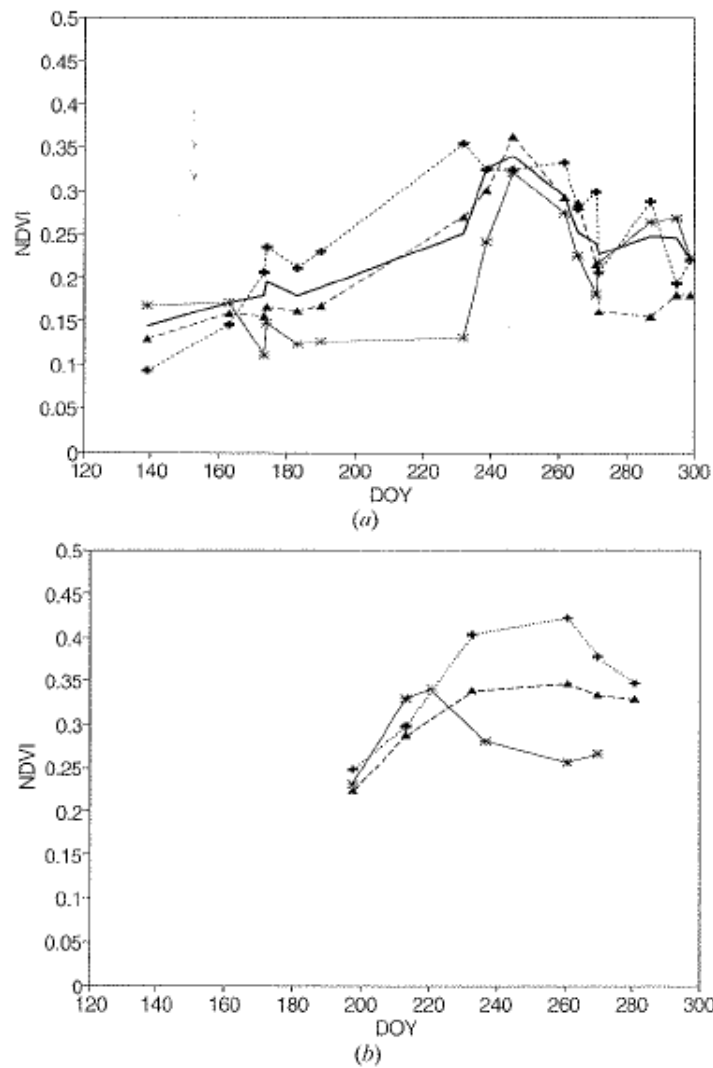


Figure 12. As figure 11 for the South site.

To test the methodology, the NDVI temporal profiles of the components on CS (figure 11(a)) and SS (figure 12(a)) are compared to the airborne NDVI acquired over the same sites (figures 11(b) and 12(b), respectively) during the HAPEX-Sahel field campaign (Hanan *et al.* 1996). The comparison cannot be quantitative because NOAA and TM channels are different and, above all, because the influence zone on NOAA images used in the calculations is about 533 km² (533 pixels), while the zone explored with the airborne radiometer is less than 1 km². Nevertheless, the shape of the profiles can be a good indicator of the quality of the method. On CS (figure 11), the NDVI profiles of each component are fairly well restituted. On both graphs, at the beginning of the growing period (Julian day 210) millet has the lower NDVI. During the growing period the NDVI of the fallow is well above the NDVI of the

other components. At the end, millet and fallow have about the same indices. The maxima of NDVI are reached at about the same time except for millet for which airborne measurements show a 'regrowth' at the end of the growing season. On SS (figure 12), the results are not as contrasted, and the comparison between measured and calculated NDVI is more difficult. Nevertheless, calculated fallow and plateau NDVI are almost confounded, which can be easily explained by the intermixing of these two classes in the region (presence of 'fallow' at the top of the plateau). The millet profile is completely different on both graph (maximum around Julian days 220 and 250 for measured and calculated reflectances respectively). To analyse the differences between the airborne and the satellite millet profiles, the seasonal profile of a NOAA pixel mainly composed of millet (82 per cent) and located close to the South site has been extracted and analysed. It displayed a maximum around Julian day 250, showing that the airborne measurements were not representative of the region. Even if the comparison must be done with caution because the airborne measurements cannot be representative of the components at NOAA scale, the results are encouraging on CS.

The difference between the two sites (earlier increase of the vegetation profiles on SS compared to CS) confirms the need of taking into account the spatial variability of the landscape components.

6. Summary and conclusions

As the signal of an AVHRR pixel is mostly a mixture of several component signals, linear mixture modelling appears to be a useful tool for image analysis. In the past years, this method has shown potential for ground cover estimates. This study shows potential for the restitution of the temporal and spatial variability of the spectral response of the landscape components. The methodology is based on the knowledge of the ground cover.

The linear mixture model was applied to a NOAA time series (1992) and a vegetation map issued from a SPOT image classification, over a HAPEX-Sahel degree square. This region is composed of a small number of vegetation types. The deconvolution of the signal was made over blocks of pixels to restrict the errors due to the misregistration between the vegetation map and NOAA images. Each block corresponds to a mixing equation, and the number of blocks equals the number of landscape components. The blocks were oriented perpendicularly to the vegetation gradient of the region to limit the variability of a component within the block of pixels. On a HAPEX-Sahel degree square, the sensitivity analysis showed that the optimal size of the blocks was 7×7 pixels. That means that the calculated spectral response of a component within a NOAA pixel is determined from the spectral response of the same component over an area of 41 km in the east-west direction and 13 km in the north-south direction. This size is large enough to smooth the fraction of soil coverage errors due to the misregistration, and small enough to have a limited reflectance variability due to the rainfall gradient.

The choice of the block size and its orientation depend on the scene. The orientation must be chosen according to information on the climatology, pedology, or on any domain contributing to the spatial variability of the spectral characteristics of the landscape components. The determination of the optimal block size is easy to calculate, and should constitute the first step of the methodology. But the strongest limitation of the method remains its sensitivity to the misregistration between NOAA images and the vegetation map. An analysis made on NOAA simulations has shown

that above one pixel of misregistration, the spectral response of the components was not correctly restituted. Furthermore, that sensitivity depends on the structure of the landscape. As expected, the method applied to a landscape made of small units will be less sensitive to the misregistration than if applied to a landscape with large and contrasted units. But, in the extreme case where all the units of landscape components are large, linear mixture modelling is not necessary to extract approximated pure spectral responses.

This methodology could have many applications in the future with the launch of SPOT4 (1997). In effect, the new instruments of this satellite will acquire simultaneously high spatial (HRVIR sensor) and temporal (Vegetation sensor) resolution images, reducing dramatically the misregistration between the two sources of information.

Acknowledgments

Financial support for HAPEX-Sahel was obtained from ORSTOM, Météo France, CNES, INSU/CNRS, Ministère de la Recherche et de l'Espace, Ministère de l'Environnement, Ministère de l'Education Nationale et de la Culture, and the Conseil Régional Midi-Pyrénées (France), ODA, NERC, the NERC TIGER programme, JEP (U.K.), NASA (U.S.A.), the European Community, and from several national funding agencies of Denmark, The Netherlands and Germany. Thanks to our collaborators in Niger at DMN, DRE, University of Niamey, INRAN, Aéroport de Niamey Authority, Groupement Aérien National, AGRHYMET, ICRISAT and ACMAD. H. Ouaidrari and A. Bégué were respectively supported by a French Government fellowship and CNES funding. Thanks to N. Hanan and S. Prince for providing the airborne measurements.

References

- AGHYMET, 1992, *Atlas agroclimatique des pays de la zone du CILSS-9: Cartes pluviométriques*. Published by CILSS, PNUD, OMM.
- CHERCHALL, S. and FLOUZAT, G., 1994, Linear mixture modelling applied to AVHRR data for monitoring vegetation. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'94), Pasadena, CA, 8-12 August 1994*, pp. 1242-1244.
- CROSS, A., SETTLE, J., DRAKE, N. and PAIVINEN, R., 1991, Subpixel measurement of tropical forest cover using AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, **12**, 1119-1129.
- D'HERBES, J., COURAULT, D., TIMOUK, F., and VALENTIN, C., 1992, *Spatiocarte des états de surface, échelle 1/200 000. Programme HAPEX-Sahel et SALT* (Niamey: ORSTOM).
- FISCHER, A., 1994, A model for the seasonal variation of vegetation index in coarse resolution data and its inversion to extract crop parameters. *Remote Sensing of Environment*, **48**, 220-237.
- GOUTORBE, J., LEBEL, T., TINGA, A., BESSEMOULIN, P., BROUWER, J., DOLMAN, A., ENGMAN, E., GASH, J., HOEFFNER, M., KABAT, P., KERR, Y., MONTENY, B., PRINCE, S., SAID, F., SELLERS, P., and WALLACE, J., 1994, HAPEX-Sahel: A large scale study of land-atmosphere interactions in the semi-arid tropics. *Annales Geophysicae*, **12**, 53-64.
- GUÉRIE, M., DE BRISIS, S., and SEGUIN, B., 1991, Combined use of earth observation satellites and meteorological satellites for crop yield assessment in semiarid environments. *Proceedings of the 42nd Congress of the International Astronautical Federation, Montreal, Canada, 7-11 October 1991*.
- HANAN, N., PRINCE, S., and HIERNAUX P. H. Y., 1991, Spectral modelling of multicomponent landscapes in the Sahel. *International Journal of Remote Sensing*, **12**, 1243-1258.
- HANAN, N., BÉGUÉ, A., and PRINCE, S. D., 1996, Errors in remote sensing of intercepted photosynthetically active radiation: an example from HAPEX-Sahel. *Journal of Hydrology* (in press).

- HOLBEN, B., and SHIMABUKURO, Y., 1993, Linear mixing model applied to coarse spatial resolution data from multispectral satellite sensors. *International Journal of Remote Sensing*, **14**, 2231–2240.
- JUSTICE, C., (ed.) 1986, Special issue on monitoring the grasslands of semi-arid Africa using NOAA AVHRR data (editorial). *International Journal of Remote Sensing*.
- JUSTICE, C., MARKHAM, B., TOWNSHEND, J., and KENNARD, R., 1989, Spatial degradation of satellite data. *International Journal of Remote Sensing*, **10**, 1539–1561.
- KERDILES, H., and GRONDONA, M., 1995, NOAA-AVHRR NDVI decomposition and subpixel classification using linear mixing in the Argentinean Pampa. *International Journal of Remote Sensing*, **16**, 1303–1325.
- LEBEL, T., SAUVAGEOT, H., HOEFFNER, M., DESBOIS, M., GUILLOT, B., and HUBERT, P., 1992, Rainfall estimation in the Sahel: the EPSAT-NIGER experiment. *Hydrological Sciences Journal*, **37**, 201–215.
- MALINGREAU, J., 1986, Global vegetation dynamics: satellite observations over Asia. *International Journal of Remote Sensing*, **7**, 1121–1146.
- OLESON, K. W., SARLIN, S., GARRISON, J., SMITH, S., PRIVETTE, J. L. and EMERY, W. J., 1995, Unmixing multiple land-cover type reflectances from coarse spatial resolution satellite data. *Remote Sensing of Environment*, **54**, 98–112.
- QUADRARI, H., IMBERNON, J. and DEDIEU, G., 1994, Use of a meteorology model to correct atmospheric effects in NOAA-AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, **15**, 2257–2271.
- PRINCE, S., KERR, Y., GOUTORBE, J., LEBEL, T., TINGA, A., BESSEMOULIN, P., BROUWER, J., DOLMAN, A., ENGMAN, E., GASH, J., HOEFFNER, M., KABAT, P., MONTENY, B., SAID, F., SELLERS, P., and WALLACE, J., 1995, Geographical, biological and remote sensing aspects of the Hydrologic Atmospheric Pilot Experiment in the Sahel (HAPEX-Sahel). *Remote Sensing of Environment*, **51**, 215–234.
- PUYOU-LASCASSIES, P., FLOUZAT, G., GAY, M., and VIGNOLLES, C., 1994, Validation of the use of multiple linear regression as a tool for unmixing coarse spatial resolution images. *Remote Sensing of Environment*, **49**, 155–166.
- QUARMBY, N., TOWNSHEND, J., SETTLE, J., MILNES, M., HINDLE, T., and SILLEOS, N., 1992, Linear mixture modelling applied to AVHRR data for crop area estimation. *International Journal of Remote Sensing*, **13**, 415–425.
- SMITH, M., ROBERTS, D., SHIPMAN, H., ADAMS, J., WILLIS, S., and GILLESPIE, A., 1987, Calibrating AIS images using the surface as a reference. *Proceedings of the 3rd Airborne Imaging Spectrometer Data Analysis Workshop* (Pasadena, CA: Jet Propulsion Laboratory), pp. 63–69.
- TAUPIN, J., LEBEL, T., CAZENAVE, F., GRÉARD, M., KONG, J., LECOCQ, J., ADAMSON, M., D'AMATO, N., and MOHAMED, A. B., 1993, EPSAT-Niger, Campagne 1992. Technical Report, ORSTOM Niamey.
- TUCKER, C., VANPRAET, C., SHARMAN, M., and IITERSTUM, G. V., 1985, Satellite remote sensing of total herbaceous biomass production in the Senegalese Sahel: 1980–1984. *Remote Sensing of Environment*, **17**, 233–249.

2.2 Processus de déforestation et écologie du paysage

La deuxième partie de mes travaux de recherche a porté sur la cartographie de l'occupation des terres et sur l'analyse des processus qui sous-tendent les changements d'occupation des terres. Cette nouvelle orientation est liée à une affectation à l'International Centre for Research in AgroForestry (ICRAF) à Nairobi, au sein du projet « Alternatives to Slash and Burn » (ASB) financé par le Global Environment Facility (GEF). Ma contribution dans ce projet était supportée par le Fond Français pour l'Environnement Mondial – FFEM). J'étais responsable de la cartographie des processus de déforestation sur les différents terrains du projet, en Amazonie brésilienne et péruvienne, en Afrique Centrale et dans le Sud Est asiatique.

De la basse résolution des capteurs de Meteosat et Noaa, je suis alors passé à la haute résolution des satellites Landsat TM et Spot. Cette vision plus proche du terrain m'a amené à m'intéresser aux théories développées en « Ecologie du paysage ». Ces apports théoriques m'ont permis d'aborder l'observation des paysages de déforestation par des approches quantitatives, avec des indicateurs mathématiques traduisant la structure du paysage, c'est-à-dire à la fois par sa composition et sa configuration. Mais mes fréquents séjours sur le terrain n'ont éveillé en moi un intérêt de plus en plus grand pour la dimension sociale et politique de ces processus de déforestation tropicale. Comment dissocier en effet la déforestation de ses multiples causes : politiques publiques, pratiques agricoles, démographie, développement d'infrastructures, ouverture aux marchés... Le programme International Géosphère and Biosphère Programme (IGBP) menait alors des réflexions intéressantes sur les « driving forces » des changements d'occupation des terres. A l'invitation d'IGBP, j'ai à cette époque participé à de nombreuses réunions internationales. Un article collectif, traduisant une partie de ses réflexions a été publié à l'issue d'une de ces réunions, tenue à Stockholm. Mes travaux ont cherché alors à mettre en relation les dynamiques de déforestation que j'avais identifiées avec des variables sociales et économiques, ou avec les infrastructures et les accès aux marchés.

2.2.1 Dynamiques de déforestation en Amazonie

Imbernon J., 1999. A comparison of the driving forces behind deforestation in the Peruvian and the Brazilian Amazon. *Ambio*, vol. XXVIII, no 6 : 509-513

A Comparison of the Driving Forces Behind Deforestation in the Peruvian and the Brazilian Amazon

On two Brazilian sites (Acre and Rondonia), and on two Peruvian sites (Yurimaguas and Pucallpa), deforestation rates and patterns are very different. To illustrate these differences, two major factors contributing to deforestation are selected: how accessible the frontier is for people including access to markets; and land abundance and land rights and markets. Even if there are commonalities between Brazil and Peru, major differences are identified. Road access to the frontier is much greater in Brazil, linking the forest to the rest of the country; most of the Brazilian farmers have gained legal title through colonization projects or by claiming land after clearing. However, access to good land in Brazil is limited and land speculation is high, whereas, in Peru there is plenty of room for expansion and land access is free.

THE GLOBAL PICTURE OF THE AMAZON FOREST—COMMONALITIES IN HISTORY AND NATURAL RESOURCES

Deforestation in the Amazon Basin has inspired research from a wide range of perspectives—from ecology to the social sciences (1–3). Examination of the causes of deforestation need to take into account the various levels and processes involved, including both direct, visible activities, and regional, national and international context in which they are embedded. The proximate causes of deforestation vary significantly across both regions and countries.

Since the Brazilian Amazon forms the largest part of the Amazonian ecosystem (63.4% is under Brazilian sovereignty), most publications on the underlying causes of deforestation are related to Brazil. Very few cover the neighboring countries or their relationship to the Brazilian situation.

Since Europeans first "discovered" the Amazon, the region has had a history of spasmodic occupation (4). The "rubber phase" at the end of the last century, facilitated by steam shipping on the Amazon rivers, was the most important. Hundred of thousands of workers were contracted, and the region achieved a high level of prosperity. Most of the main cities—Iquitos, Yurimaguas and Pucallpa in Peru; Manaus, Porto Velho and Rio Branco in Brazil—were built during this period. Until the end of World War II, the Amazon could be considered as a whole, with few anthropic constraints, in spite of political boundaries. From a natural resources perspective there are strong commonalities between the Peruvian and the Brazilian Amazon.

First, the Amazon River and its basin, which contain about 20% of the total water surface of the world (excluding the polar ices), rely on the different countries for access to the ocean. Rivers were the only way to penetrate the forest and export the extracted products. Second, the lowland tropical wet forest is a productive ecosystem (5) despite sterile soils, excessive rainfall, and a superabundance of pathogens and pests. There are few general descriptions of the Amazonian forest vegetation and no published flora. Outwardly the physiognomy of most of the area covered by the wet forest is uniform and rich in botanical diversity—with at least 30 000 species of plant life. This high level of

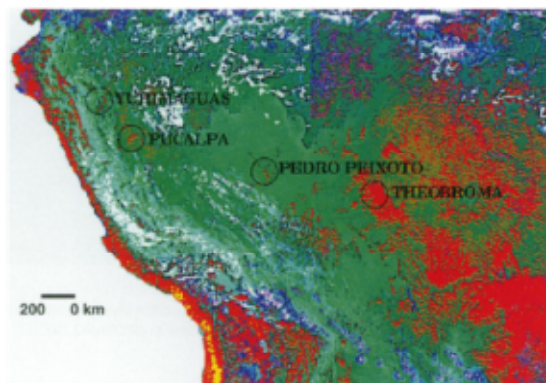


Figure 1. Location of the ASB benchmark sites on a 1993 NOAA-AVHRR mosaic.

biodiversity is one of the major characteristics of the Amazonian forest.

There were also social commonalities (6). The Amazon was considered an untouched space, which represented resources and hopes for many countries, with myths like 'promised land' and 'new frontier'. This led to a mosaic of indigenous people and migrants inhabiting the region.

During the second half of the 20th century the integration of the Amazon into national development processes began. The 1960s and 1970s saw major roadworks, for example, Cuiabá-Porto Velho in Brazil and Lima-Pucallpa in Peru, followed by various levels of agriculture and livestock development. Both countries had a common objective: occupation of the territory.

MAJOR DIFFERENCES IN DEFORESTATION RATES AND PATTERNS

Large differences are obvious between Peru and Brazil, particularly in regard to the deforestation process. To compare the driving forces behind deforestation, we look at two sites in each country, which correspond to benchmark sites of the Alternatives to Slash-and-Burn Programme (7) (see Fig. 1): - Pucallpa (Ucayali region) and Yurimaguas (Alto Amazonas region) in Peru; - Pedro Peixoto (state of Acre) and Theobroma (state of Rondonia) in Brazil.

Both Pedro Peixoto and Theobroma are colonization areas, and can not be considered as representative of the entire Brazilian Amazon. Pucallpa is linked by a paved road to Lima on the Pacific coast, while the only link between Yurimaguas and other regions is the river. Pucallpa and Yurimaguas represent the range of situations in the Peruvian Amazon, and their deforestation patterns appear different (Fig. 2). In the two Brazilian sites (Fig. 2a, b), deforestation is characteristic of Brazilian colonization areas shaped by dense road networks (linear type, fishbone type) and influenced by towns (concentric type). From these features, deforestation can be seen as a front (massive type) moving across

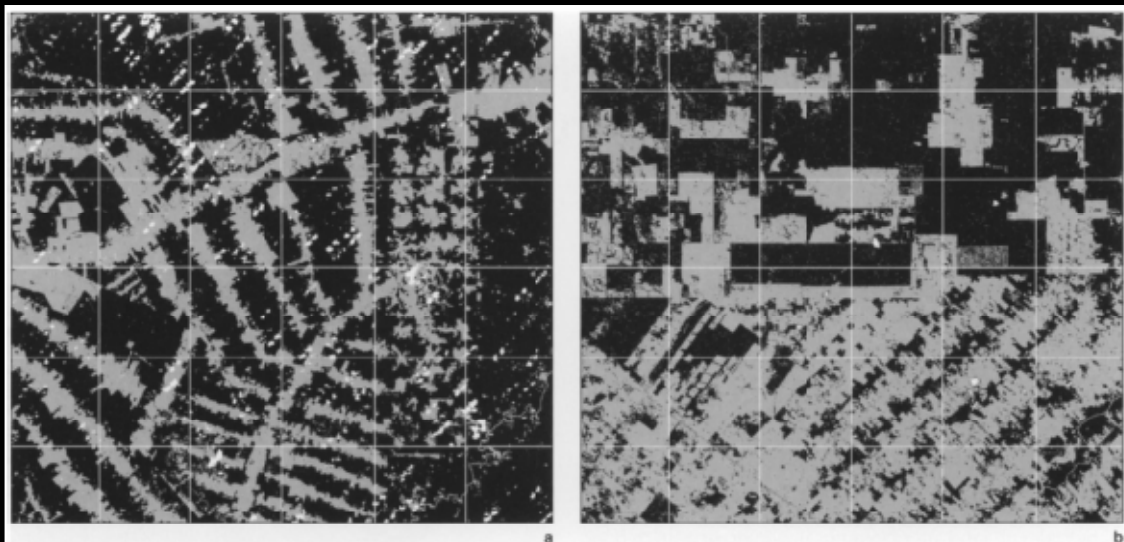


Figure 2. Deforestation landscape patterns on the different benchmark sites: Pedro Peixoto (a), Theobroma (b), Pucallpa (c) and Yurimaguas (d).

the landscape. In the region of Pucallpa (Fig. 2c), most of the deforestation occurs along the Pucallpa–Lima road. Secondary roads and rivers are additional features with deforestation (linear type). In the region of Yurimaguas (Fig. 2d), deforestation is mainly around the city of Yurimaguas (concentric type), along the numerous rivers (linear type) and along the track to Tarapoto (linear type). A little farther from these features, deforestation becomes more diffused, in small patches (diffuse type).

Annual deforestation rates in Yurimaguas and Pucallpa (Peru) are similar and low—0.48% (8) and 0.49% (9), respectively for 1989–1995. On the other hand, the annual deforestation rates in Pedro Peixoto and Theobroma (Brazil) are very high—2.63% for 1992–1996 and 4.10% for 1994–1996, respectively.

These very different deforestation rates and patterns, in similar biophysical and historical conditions, are driven by different factors.

To analyze this point, and despite many and various driving forces (10, 11)—land management (proximate cause), socio-economic drivers and biophysical drivers—we have deliberately selected two of the main factors contributing to deforestation: *i*) first how accessible the frontier is for the people, and the access to markets (proximate cause); and *ii*) land abundance, and land rights and markets (socio-economic driver) (12).

FRONTIER ACCESS AND ACCESS TO MARKETS

From a national perspective, the main problem since colonization has been linking the Amazon forest to the rest of the country. Roads and rivers are ways to colonize the Amazon forest—and they also offer access to markets.

Rivers have long been the major links between regions of the Amazon, with 80 000 km of navigable waterways, and with ocean steamers able to penetrate 3700 km inland (4). Rivers were the main way to penetrate the forest, and they have structured the human occupation of the Amazonian landscape along the Amazon River and the Rio Madeira in Brazil, and the Rio Huallaga and Rio Ucayali in Peru. The cities of Amazonia are along these rivers. In Yurimaguas and to a lesser extent Pucallpa, most cultivated land is along rivers. In Yurimaguas, 62% of all

croplands are located less than 3 km from a river (Fig. 3), with the level of cropping decreasing exponentially with distance. However, rivers do not make massive colonization possible, as it is difficult to penetrate the forest.

That is why more than 14 000 km of highway have been opened through the Amazon forest during the last decades, with a network of secondary and tertiary roads. These allow people to clear forested areas. In Acre in 1992, for example, 40% of cultivated lands were located less than 300 m from a road (8). As with distance from rivers in Yurimaguas, land-use intensity decreases exponentially with distances from roads (Fig. 4).

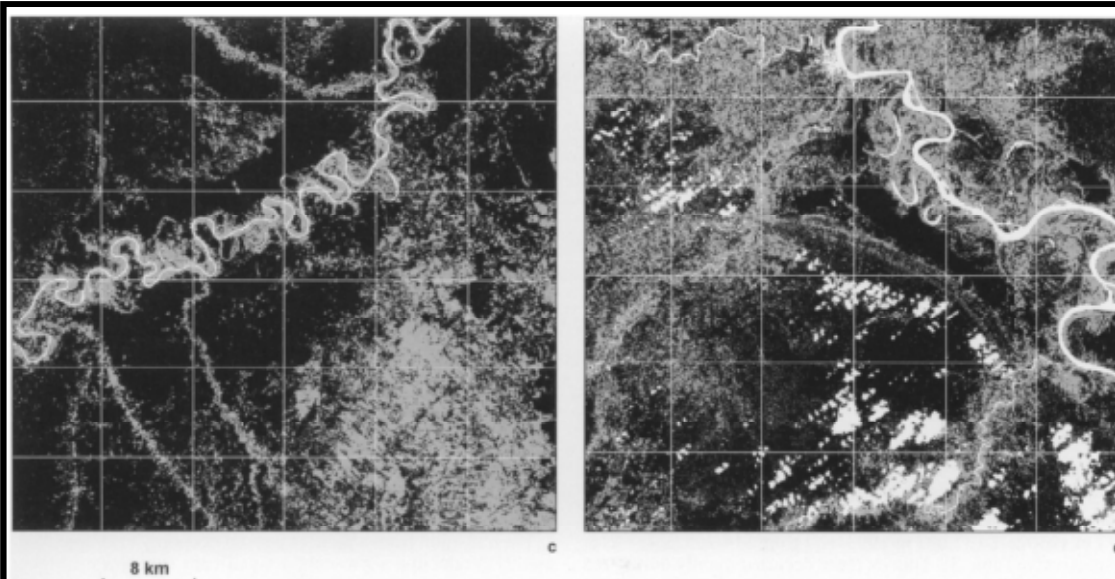
However, there are large differences in road network densities between the Peruvian and the Brazilian sites (Table 1).

In Peru, the Frederico Basadre road (843 km) is the main road between Lima and Pucallpa. It was opened in 1943 and paved during the 1970s. This road is the only road link between the Amazon forest and the countryside, and creates access that is different from that possible by river. It gives access to the markets of Lima and access also, through the Pacific Ocean harbour, to international markets.

However, although specific Amazonian products, such as 'guarana' and heart-of-palm, are attractive to the international market (13), these markets are either not well-developed internationally (guarana) or local transformation units are lacking (heart-of-palm).

As there is little or no integration with international markets, most of the products of the Peruvian Amazon are sold within the country in the urban centers. These centers have grown rapidly, leading to urbanization of the Amazon regions (Table 2). However, despite rapid growth, these urban centers remain of low importance in Peru.

Moreover, the Yurimaguas region exports products mainly through Rio Huallaga to Iquitos or Manaus. Only wood products are exported by truck through Tarapoto to Lima. This trade is mainly for heavy products such as wood and meat, and at low volume. The economy of Yurimaguas would be autarchic if it were not for the illegal coca production, which is entirely driven by international markets. Even if the Pucallpa region is also producing illegal drugs, it offers a larger city market and access to the Pacific Ocean for legal products.



The state played a crucial role in colonization projects, road openings and incentives in the Brazilian Amazon frontier (14). As a result of state guidance in the Amazon economy, forest was converted to pasture as a means of capturing rents created by credit and subsidies. Hecht (15) has said, "International market dynamics have little to do with the expansion of livestock", and links to the regional economy remain weak even if local urban centers consume Amazon meat. However, Schneider (16) says that the government's subsidy policy is unlikely to be currently playing an important role in the recent rapid growth of the cattle population.

On the other hand, deforestation in Rondonia and Acre is strongly linked to changing economic conditions in the south, and mainly in the state of Parana. There, with the soybean success story came the modernization of agriculture, and small-scale agricultural systems were transformed into commercial and

Figure 3. Relationship between cultivated area and distance from rivers in Yurimaguas.

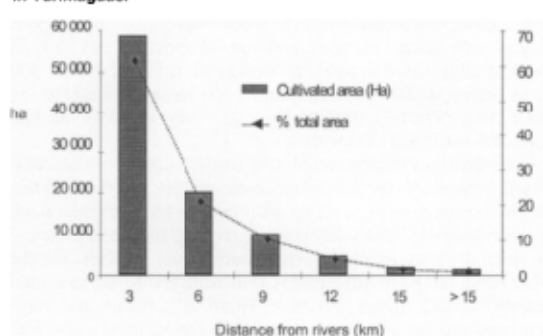


Figure 4. Relationship between proportion of cultivated area and distance from roads in Pedro Peixoto.

Table 1. Road network density in kilometers of road per 1000 km² on the ASB benchmark sites measured on LANDSAT images (34 225 km²) and SPOT images (3600 km²).

Benchmark site	Sample area	
	34 225 km ²	3600 km ²
Yurimaguas	5.3*	25.0
Pucallpa	23.4*	137.8
Pedro Peixoto	57.0	205.5
Theobroma	187.0	165.3

* estimated

Table 2. Population of Ucayali and Alto Amazonas in Peru.

	Region Ucayali		Province Coronel Portillo		Pucallpa
	Urban	Rural	Urban	Rural	City
1940	5 332 (33%)	10 822 (67%)	—	—	—
1972	67 675 (56%)	52 826 (44%)	—	—	—
1993	204 795 (65%)	110 015 (35%)	189 301 (73%)	71 085 (27%)	172 286
	Region Alto Amazonas		Province Yurimaguas		Yurimaguas
	Urban	Rural	Urban	Rural	City
1994	48 447 (43%)	65 457 (57%)	30658 (61%)	19 711 (39%)	30 658

Table 3. Population of Rondonia and Acre in Brazil.

	State of Rondonia		State of Acre		Porto Velho	Rio Branco
	Urban	Rural	Urban	Rural	City	City
1950	13 816 (37%)	23 119 (63%)	21 272 (18%)	93 483 (82%)	27 244	28 246
1972	59 564 (54%)	51 500 (46%)	39 307 (27%)	155 992 (73%)	84 048	83 977
1993	659 327 (58%)	473 365 (42%)	258 520 (62%)	159 198 (38%)	287 534	197 376

Source: IBGE (Brazil) and INEI (Peru).

Table 4. Extent of different crops (in '000 ha).

Crop	Ucayali	Rondonia	Acre
Cacao	—	43	—
Coffee	—	122	1
Guarana	—	1	—

Source: IBGE (Brazil) and INEI (Peru).

Table 5. Potential land use in Pucallpa and Yurimaguas.

Region	Crops (%)	Pastures (%)	Total (%)
Pucallpa	39.6	6.4	46.0
Yurimaguas	16.2	16.4	32.6

Source: (13).

mechanized farms. This led to a number of small farmers and laborers coming to Rondonia and Acre.

The total population in Rondonia and Acre increased from 36 935 in 1950 to 1 132 692 in 1993, and from 114 755 to 417 718, respectively (Table 3). This increase occurred mainly during the 1970s and 1980s when the colonization programs were implemented. After this phase of colonization, urbanization has followed (17), and the cities in both states have increased in size. The local markets of these cities can absorb part of the regions' agricultural production.

A comparison of the perennial crop extent between Brazil and Peru, shows that Rondonia is the most market oriented, Acre is only slightly market oriented, and that the agriculture in Ucayali is not at all oriented to markets. Rondonia in 1993 had 122 000 ha in coffee, 43 000 in cacao, and 1000 ha in guarana. In the same year, Acre had 1000 ha in coffee only, and Ucayali had none of these crops (Table 4).

Comparison of frontier access and market access between Brazil and Peru shows the following commonalities: *i*) roads and rivers are the means of penetrating deep into the forest to clear land; *ii*) there is a process of urbanization, creating local markets; and *iii*) there are very few links with international markets. On the other hand, there are differences: *i*) in Acre and Rondonia, road density is much higher, access to frontiers is better, and ways to commercialize are easier; and *ii*) the incentive to grow illegal crops is strong in Peru.

LAND ACCESS AND LAND TENURE

In the Peruvian Amazon, land is relatively abundant: only 13.6% of the Amazonia region is under crops and pastures, but 61.4% is under forest and 25.0% is in protected areas. This abundance has promoted agricultural systems that are not at all intensive (in contrast to the highlands), based on shifting cultivation and slash-and-burn practice. This phenomenon is commonly associated with an agricultural and demographic frontier (18). This frontier is also characterized by very low population densities, 2.2 inhabitants km⁻² in Alto Amazonas (Yurimaguas region) and 3.6 inhabitants km⁻² in Ucayali (Pucallpa region) (19).

Even if the potential use of soils for agriculture—both crops and pastures—is only medium, because of low fertility, the regions of Pucallpa and Yurimaguas still have potential for agricultural expansion (Table 5).

Migratory movement from the Andean highlands to the highland forest ('selva alta'), and later to the lowland forest (Yurimaguas region) has occurred over the last decades, because of continued impoverishment of the peasant populations and an increase in the response to the demand for coca. These migrants have a strategy of minimizing risk during the initial stages of

their resettlement in the Amazon forest. They invest nothing, and are only using the capital represented by the fertility of soils after slashing and burning the forest.

The transition from a pioneer peasant economy to simple commodity production represents a significant step toward higher incomes and a greater link with the market economy. In the later stages of transition, farmers cultivate cash crops that are favored by high national prices, or develop livestock extensively, at high load: 2.1 cows ha⁻¹ compared to figures for the humid tropics of 0.5 cows per ha⁻¹ (20). Almost all produce is sold on the local market (21).

On the other hand, the practice of extensive legal agriculture is also highly related to coca production. Since the 1980s, land, capital, and labor have been directed to coca production as it is more profitable than any legal crop, approximately 200 000 ha are planted in coca. These plantations are in remote areas, and because of the eradication program they are now dispersed and hidden within the tropical forest.

Most of the farmers (61%) in the regions of Pucallpa and Yurimaguas do not have legal title (20). Farms are relatively small in size—61% are less than 10 ha and 78% less than 20 ha. During farm interviews in Yurimaguas, a price was cited of USD 400 for 5 ha of cleared land. But, because land is readily available in the forest, it appears that there is no real market for it.

In the Brazilian Amazon, on a total of 490 million ha of the 'legal Amazon', 396 million ha were originally under forest, and 90% were still intact in 1989 (22). Thus, the Brazilian Amazon still has room for human land use. However, the situation is very different between states: Amazonas and Amapa are 99% forested, Maranhao is only 46% forested and Tocantins 44%. Between these extremes, there are Acre with 94% in forest and Rondonia with 85% (22). Both states are large-scale state-sponsored colonization areas, part of the national integration program established in 1970 (14). They are linked to the rest of the country by the BR-364 highway, from Cuiaba (Mato Grosso) to Porto Velho (Rondonia), opened in 1968 and paved in 1984, and from Porto Velho to Rio Branco, paved in 1993. In this sense, these states are not representative of the whole Amazon but are areas where deforestation pressure is high, and are structured by social and political constraints. These 2 states have also a very low population density: 4.75 inhabitants km⁻² in Rondonia and 2.73 in Acre in 1991—similar to Alto Amazonas and Ucayali regions in Peru. Moreover, as in the entire Amazon Basin, the quality of soils is poor. Soil fertility in Rondonia is better than average, with around 9% of the area in land-titling projects rated as having 'good' soils (23). Acre soils are generally poorer than those of Rondonia. Unfortunately, no systematic study of soil fertility has yet been undertaken. Because of the poor quality of the soils,

the best soils were depleted during colonization projects, and little usable land is available now.

In Pedro Peixoto, Acre, colonization began in 1972, with 370 000 ha divided into 3700 lots located between 50 and 100 km from Rio Branco (state capital) along the BR-364 highway. In Theobroma (Rondonia), colonization began in 1979, with over 300 000 ha divided into 3000 lots, about 350 km from the state capital, Porto Velho, along the BR-364 highway.

People who settled on colonization projects were given titles for 100-ha lots with basic services and infrastructure. But many who were allocated land also staked out claims on the fringes of the official project, establishing a strong legal claim. Thus, in Rondonia most of the land is titled through the colonization projects. There is also a very active market for land, as migrants are able to realize large capital gains by selling their lots. In the Theobroma colonization project, by 1995 (15 years after it was established), 80% of the lots had changed ownership. The gains from land speculation appear very high, and as a consequence it is one of the main driving forces of deforestation.

Comparison of land access and land tenure shows the following commonalities between Brazil and Peru: the forest proportion is still high: 60 to 80%, and population densities are very low: 2.2 to 4.7 inhabitants km⁻²; There are few 'good' soils for agriculture, and soils are usually fragile. Whoever has cleared land can lay claim to it. On the other hand, there are significant differences: there is little free land for appropriation by pioneers in Acre and Rondonia; most of the farmers in Brazil have gained legal title through colonization projects or by claiming land after clearing it; and there is speculation on land in Brazil, which is changing ownership through many transactions.

CONCLUSIONS

From a natural resources perspective, the Peruvian and the Brazilian Amazon have many commonalities, such as the same water basin, an outwardly uniform forest, fragile soils and high rainfall. This has meant that the public at large perceives the Amazon as a whole, from environmental point of view presented in the media. But this apparent homogeneity is broken by the current process of deforestation, which is occurring at different rates in Peru and Brazil.

The comparison of two main driving forces behind deforestation; how accessible the frontier is for people and the access to markets; and land abundance and land rights and markets between Brazilian and Peruvian sites, highlights some major differences. Road access to the frontier is much greater in Brazil than in Peru, as the road network is more dense and links to the rest of the country are better. Consequently, Brazilian sites are more market oriented and strongly linked to outer economic conditions. On the other hand, in Brazil, land access is much more state controlled and farmers have title to their land. But, access to good land is limited for pioneers and there is a speculative market for land, whereas in Peru there is plenty of room for expansion and land access is free.

The very high rates of deforestation observed in Rondonia are related to road access to the frontier and to land tenure and speculation, and indeed the Brazilian policies are the direct driving force behind deforestation. Even though there are strong commonalities in history and in natural resources, the various Brazilian and Peruvian policies during the past decades have shaped different landscape patterns and dynamic of deforestation.

References

1. Moran, E.F. 1981. *Developing the Amazon*. Indiana University Press, Bloomington, USA.
2. Myers, N. 1984. *The Primary Source: Tropical Forests and Our Future*. WW Norton, New York.
3. Collins, J.L. 1986. Smallholder settlement of tropical America: the social causes of ecological destruction. *Human Ecology*, 45, 1-9.
4. Goodland, R.J.A. and Irwin, H.S. 1975. *Amazon Jungle: Green Hell to Red Desert?* Elsevier, Amsterdam, The Netherlands.
5. Jordan, C.F. 1971. Productivity of the tropical forest and its relation to a world pattern of energy storage. *J. Ecol.* 59, 127-142.
6. Egg, A.B. 1994. Medio ambiente, economía y viabilidad en la Amazonia peruana. In: *Biodiversidad y desarrollo sostenible de la Amazonia en una economía de mercado*. Toledo, J. (ed.). Memoria del Seminario-Taller, Pucallpa, Peru, 11-15 de octubre 1994. Lima, pp. 45-62. (In Spanish).
7. The Alternatives to Slash-and-Burn Programme is an ecoregional programme being carried out in tropical humid forests; it is funded by the Global Environment Facility and the Fond Français pour l'Environnement Mondial.
8. Imbernon, J. 1996. *Visions of Landscapes and Vegetation Changes*. Working paper CIRAD, Montpellier, France.
9. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana (IIAP). 1996. *Deforestación en el área de influencia de la carretera Federico Basadre—Pucallpa*. IIAP, Iquitos, Peru, 73 pp. (In Spanish).
10. Wood, C.H., Skole, D., Perz, S. and Caetano, A. 1996. *Population and Deforestation in the Brazilian Amazon*. Paper presented at the annual meeting of the Population Association of America, 9-11 May 1996, New Orleans, USA.
11. International Geosphere-Biosphere Programme (IGBP). 1995. *Land-Use and Land-Cover Change. Science/Research Plan*. IGBP Report 35, Stockholm, Sweden, 132 pp.
12. Imbernon, J. 1997. *Population Growth and Deforestation: The Case of Rondonia in the Brazilian Amazon*. CIRAD, Montpellier, France.
13. Toledo, J.M. 1994. El desarrollo sostenible amazónico en una economía de mercado: un análisis crítico. In: *Biodiversidad y desarrollo sostenible de la Amazonia en una economía de mercado*. Toledo, J. (ed.). Memoria del Seminario-Taller, Pucallpa, Peru, 11-15 de octubre 1994. Lima, pp. 1-42. (In Spanish).
14. Mahar, D.J. 1989. *Government Policies and Deforestation in Brazil's Amazon Region*. World Bank, Washington, DC.
15. Hecht, S.B. 1993. The logic of livestock and deforestation in Amazonia. *BioScience* 43, 687-695.
16. Schneider, R.R. 1995. *Government and the Economy of the Amazon Frontier*. World Bank Environment paper No 11, World Bank, Washington DC, pp. 65.
17. Becker, B.K. 1996. Undoing myths: the Amazon—an urbanized forest. In: *Brazilian Perspectives of Sustainable Development of the Amazon Region*. Man and Biosphere series 15 (chap. 4), Unesco, Paris, pp. 53-89.
18. Boserup, E. 1981. *Population and Technological Change: A Study of Long Term Trends*. University of Chicago Press, Chicago.
19. Instituto Nacional de Estadística (INEI). 1995. *Compendio estadístico 1994-95*. Instituto Nacional de Estadística e Informática, Lima, Peru. (In Spanish).
20. Instituto de Investigaciones de la Amazonia Peruana (IIAP). 1994. *Diagnostico de la investigación en Ucayali*. IIAP, Iquitos, Peru, 300 pp. (In Spanish).
21. Aramburo, C.E. and Tavera, J. 1993. Colonización, población e intensificación de la agricultura en la Amazonia peruana. In: *Desarrollo rural en la Amazonia peruana*. Luker, W.N. and Vosti, S. (eds). CIAT, Cali, Colombia, pp. 177-205. (In Spanish).
22. Moran, E.F. 1993. Deforestation and land use in the Brazilian Amazon. *Humor Ecol.* 21, 1-21.
23. de Almeida, O. 1992. *The Colonization of the Amazon*. University of Texas Press, USA.
24. First submitted 20 April 1998. Accepted for publication after revision 18 February 1999.

Jacques Imbernon is a senior scientist in remote sensing. He was Director of Research for remote sensing and GIS at CIRAD France from 1991 to 1994. Since January 1998 he is the lead scientist of the 'resources and land management' project at CIRAD France. His address: CIRAD, BP 5035, F-34032 Montpellier, France. E-mail: imbernon@cirad.fr

2.2.2 Déforestation et pression démographique en Amazonie

Imbernon J., 2000. Déforestation et pression démographique au Rondonia, Brésil.
Bois et Forêts des Tropiques, (266) : 23-33



DEFORESTATION

Déforestation et pression démographique au Rondônia, Brésil

L'auteur distingue deux processus principaux de déforestation dans le *município* de Theobroma (État du Rondônia, au Brésil) : la mise en valeur agricole des zones de colonisation par de petits agriculteurs migrants et la spéculation foncière au travers de l'élevage extensif. Les observations montrent que la démographie n'est pas le seul facteur explicatif de la déforestation.

Jacques IMBERNON

L'Amazonie brésilienne est, depuis plus de 20 ans, le théâtre d'une rapide conversion de la forêt tropicale humide par l'agriculture (MAHAR, 1989). Cette déforestation massive n'est pas attribuable aux populations locales. Elle est plutôt liée à l'arrivée de migrants et à la réalisation d'infrastructures routières (MORAN, 1993), toutes deux soutenues par des programmes volontaristes de colonisation du gouvernement brésilien.

LA DÉFORESTATION, CONSIDÉRATIONS THÉORIQUES

Comme c'est souvent le cas pour les processus de dégradation environnementale, le facteur de déforestation le plus communément admis est la pression démographique (ALLEN, BARNES, 1985). Toutefois, les nombreux travaux de recherche sur ce sujet présentent des analyses et des résultats très divers et parfois contradictoires, et l'identification d'une relation entre déforestation et population est un débat ouvert.

Les considérations théoriques habituelles sur le sujet font apparaître les « malthusiens » et les « boserupiens » (BOISSEAU, 1998). Les premiers pensent que l'accroissement de population entraîne une détérioration de l'environnement et les seconds une évolution des systèmes de production [...] qui préserverait l'environnement]. Ici, nous ne nous sommes pas entrés dans ces considérations et nous nous sommes intéressés plutôt aux travaux de certains auteurs (SKOLE et al., 1994), qui font apparaître le facteur de pression démographique statistiquement significatif à l'échelle régionale, mais non significatif en revanche à l'échelle locale du fait d'un trop grand nombre de facteurs en jeux.

MUNICÍPIO DE THEOBROMA DANS L'ÉTAT DU RONDÔNIA

ACCROISSEMENT DÉMOGRAPHIQUE

La présente étude porte sur l'État du Rondônia et l'un de ses *municípios*, Theobroma (figure 1). Dans le contexte particulier de l'Amazonie brésilienne où nous nous situons, certains auteurs ont souligné également que l'expansion de la frontière est un phénomène principalement urbain (BECKER, 1996). Ils ont montré que le rapport entre les populations urbaine et rurale continue de croître, et que l'accroissement démographique est influencé plus par les villes que par les zones rurales. Ce processus d'urbanisation nous semble mériter d'être analysé dans le cas du Rondônia.

DÉFORESTATION ET DÉVELOPPEMENT DE L'ÉLEVAGE

D'autres auteurs (HECHT, 1993) ont mis en évidence le lien étroit entre la déforestation et le développement de l'élevage, résultant en grande partie de l'attribution de subventions et du contexte macroéconomique favorable à un élevage extensif. Il est vrai qu'au Rondônia les ranchs sont nombreux et étendus. Ainsi, il est facile de les identifier sur des images satellitaires d'observation de la terre comme celles de la figure 1. Ces ranchs de plusieurs milliers d'hectares chacun ont en moyenne une faible charge de bovins à l'hectare et ils n'emploient qu'une personne pour 300 ha (MORAN, 1993). De fait, le développement de ce type d'élevage a une incidence sur d'éventuelles relations entre la déforestation et la pression démographique.

■ DÉFORESTATION

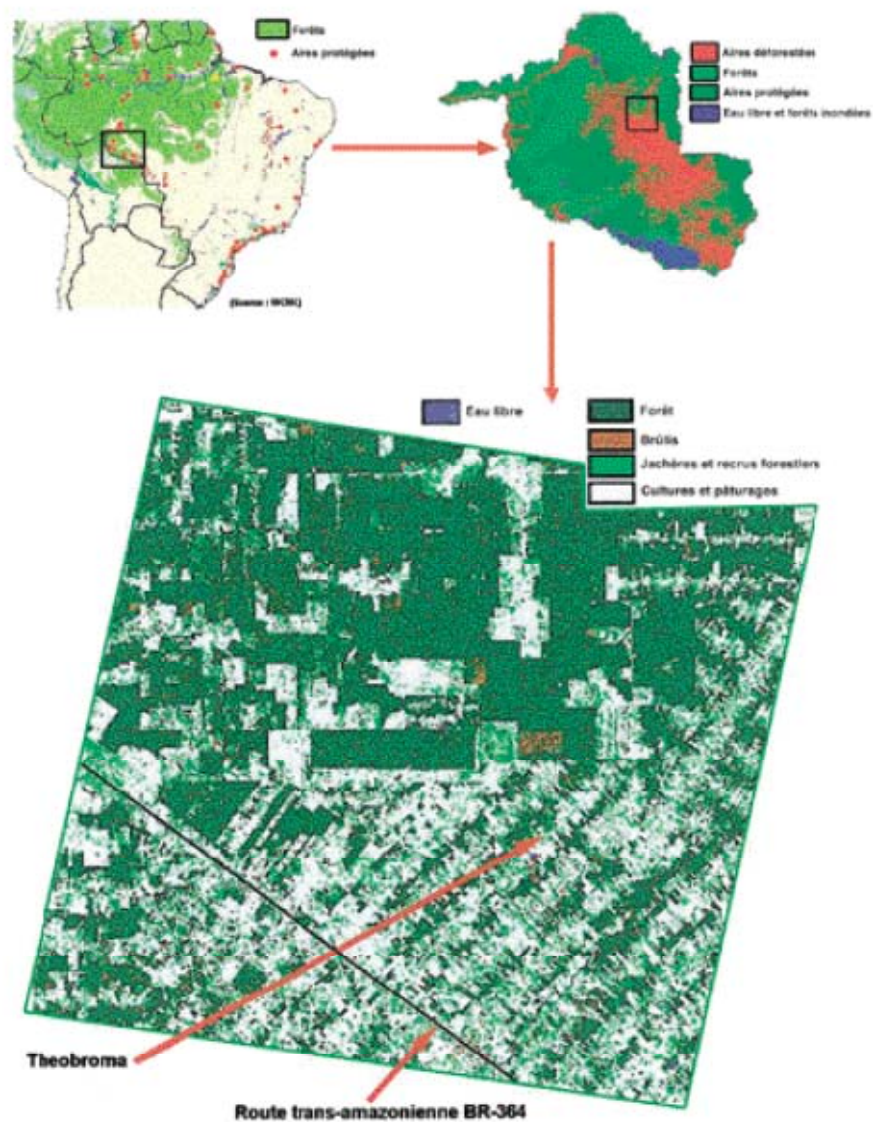


Figure 1. Localisation de la commune de Theobroma, dans l'État de Rondônia, au Brésil.
Location of the commune of Theobroma in the State of Rondônia, Brazil.



Photo 1. Pâturage en bordure de forêts au sud de la ville de Yurimagas, au Pérou.
Grazing lands on the forest edge south of the town of Yurimagas, in Peru.

SPÉCULATION FONCIÈRE ET DÉFORESTATION

Enfin, au Rondônia, la spéculation foncière contribue aussi à la déforestation (MAHAR, 1989). L'application de la règle « celui qui a abattu la forêt a amélioré la terre et a, en conséquence, acquis le droit de vendre cette amélioration » crée des conditions favorables à un marché foncier très dynamique. Dans le *município* de Theobroma, 80 % des parcelles allouées ont été vendues depuis le démarrage du programme de colonisation, en 1978. Ce dynamisme du marché foncier a entraîné des mouvements de population à l'intérieur même de l'espace amazonien : si une partie de ces populations va grossir les villes, une autre partie s'est déplacée vers de nouveaux fronts pionniers, suivant ainsi une stratégie de spéculation foncière.

À la lecture de ces différents travaux de recherche, il n'y aurait donc pas de relation univoque entre le processus de déforestation et la pression démographique au Rondônia. Toute relation n'aurait de sens que si

l'on identifiait les processus en jeu, aux différentes échelles de temps et d'espace.

Dans l'État du Rondônia et dans l'un de ses *municípios* Theobroma, nous avons cherché à identifier et à analyser ces relations complexes, en utilisant des images classées satellitaires à haute résolution et les données des derniers recensements. L'interprétation de ces relations s'appuie en grande partie sur des observations et des enquêtes qui ont été réalisées sur le terrain.

POPULATION URBAINE ET POPULATION RURALE

La perception la plus communément partagée de l'Amazonie est celle d'une zone rurale, une frontière pour des agriculteurs démunis qui sont à la recherche de terres pour s'installer et qui, pour ce faire, abattent la forêt sur ces terres. Toutefois, BECKER (1996) montre que « les

centres urbains absorbent plus de migrants que les zones rurales » et, de façon provocatrice, il affirme « l'Amazonie est une forêt urbanisée ». La perception commune que nous avons de l'Amazonie peut ainsi être à des lieux de la réalité.

DANS LES ANNÉES 70 ET 80

Entre 1950 et 1996, la population totale du Rondônia est passée de 36 935 à 1 221 290 habitants, soit une augmentation de 330 % en 45 ans (figure 2). Ce boom s'est produit principalement durant les années 70 et 80 quand les programmes de colonisation furent mis en œuvre par le gouvernement avec la Superintendencia del Desenvolvimento del Amazonia (SUDAM) et la Banco de Amazonia (BASA). Plus précisément, le mouvement commença avec la réalisation des 1 500 kilomètres de la route BR-364 reliant Cuiabá, dans l'État du Mato Grosso, à Porto Velho, dans l'État du Rondônia, et qui fut suivie par une vague de migrations. Alors que précédemment la grande majorité des occupants du Rondônia était venue du nord et du nord-est par les rivières Madeira et Amazone (les traces d'occupation le long des réseaux hydrographiques sont encore observables sur les images satellitaires), le nouveau contingent de migrants était alors constitué principalement de petits paysans sans terre de l'État du Paraná, au sud du Brésil (MAHAR, 1989). Plus récemment, dans les années 90, après cette phase d'immigration, la population de l'État de Rondônia semble toutefois s'être stabilisée (figure 2).

À PARTIR DES ANNÉES 80

Jusqu'en 1980, le rapport entre la croissance de la population urbaine et la croissance de la population rurale au Rondônia a été équilibré. C'est à partir de 1980 que la population urbaine a commencé à croître

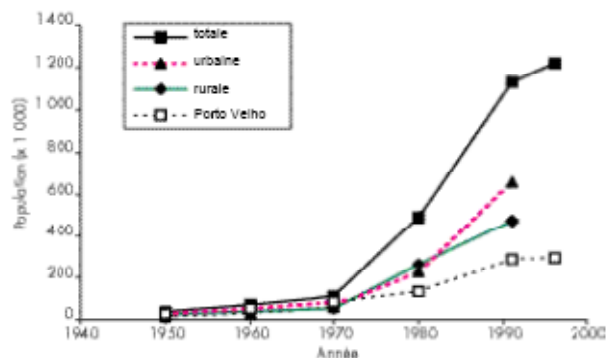


Figure 2. Evolution de la population dans l'État de Rondônia. Source : IBGE, 1998. Population growth in the State of Rondônia. Source: IBGE, 1998.

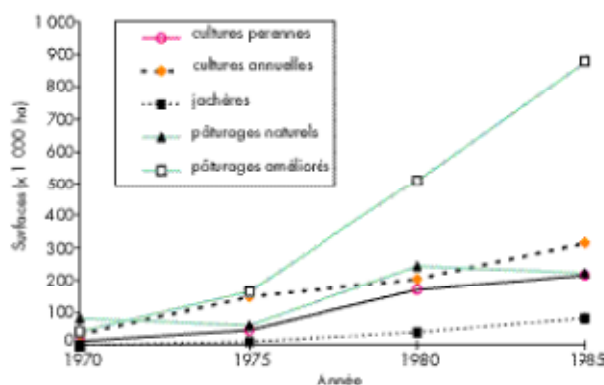


Figure 3. Changement d'occupation des sols dans l'État de Rondônia. Source : Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 1996. Changing land use in the State of Rondônia. Source: IBGE, 1996.

plus rapidement que la population rurale (figure 2). Les taux d'accroissement démographique atteignent entre 1970 et 1980 des valeurs supérieures à 10 %, que ce soit en zone urbaine ou rurale. Mais, ensuite, le taux d'accroissement diminue pour atteindre en 1996 le taux de 1,6 % seulement (à rapprocher de 1,2 % pour l'ensemble du Brésil).

Ainsi, donc, le processus d'urbanisation du Rondônia que nous observons a été concomitant avec la colonisation agricole.

A l'heure actuelle, outre le fait que plus de migrants se dirigent vers les centres urbains que vers les zones rurales, les centres urbains absorbent aussi le surplus de main-

d'œuvre rurale qui s'est dégagé après les travaux d'abatage de la forêt sur les projets de colonisation (BECKER, 1996).

COLONISATION ET RANCHING

PROJETS DE COLONISATION ET COLONISATION SPONTANÉE

La majorité des migrants ruraux s'est installée sur l'un des sept projets de colonisation que l'Institut national pour la colonisation et la réforme agraire (INCRA) a établi, entre 1970 et 1975, sur 2,7 millions d'hectares. Pour un faible prix, les migrants ont pu obtenir des parcelles de 50 à 100 hectares, accompagnées de services de base et d'infrastructures. Par effet d'attraction, la taille et la vitesse de ces flux migratoires a rapidement augmenté, et l'impact sur la forêt est devenu de plus en plus fort, tant sur les projets officiels de colonisation, qu'à la périphérie de ces projets, qui a été envahie par des colons spontanés.

PROGRAMME DE DÉVELOPPEMENT INTÉGRÉ DU NORD-OUEST BRÉSIL

En 1981, le gouvernement du Rondônia décide de bitumer la route BR-364 dans le cadre du grand programme de développement intégré du nord-ouest Brésil (POLONOROESTE). S'ensuit alors une nouvelle vague d'immigration qui augmente encore la déforestation.

Ces colons commencent d'abord par abattre et brûler des parcelles de forêt pour des cultures annuelles pratiquées durant un à trois ans, selon le niveau de fertilité des sols (figure 3). Puis, sur cette même parcelle, ils mettent en place un pâturage. Les statistiques de 1996 dans le *munícipio* de Theobroma donnent, sur les 46 % de terres déforestées, 26 % de pâturages, 8 % de jachères, 7 % de cultures annuelles et 5 % de cul-

tures pérennes (FUJISAKA et al., 1996).

Ainsi, actuellement, dans les zones de colonisation, les pâturages dominent et leur emprise ne cesse d'augmenter. Les données de recensement du Rondônia sur la période 1970-1995 (figure 3) indiquent une utilisation des terres et une tendance similaire. La surface en pâturages y est supérieure à la somme des surfaces de toutes les autres cultures ; elle représente les deux tiers des surfaces agricoles.

CRÉATION DE VASTES RANCHES

Durant la même période de 1970 à 1985, de vastes ranchs de plus de 10 000 ha ont été créés avec ou sans l'appui de la SUDAM. Au cours de l'année 1987 seulement, 579 de ces ranchs avaient été créés (HECHT, 1993). Actuellement, les seuls ranchs de la SUDAM couvrent 8 763 000 ha. Mais de nombreux autres ranchs, établis par des entrepreneurs et des spéculateurs, comme les ranchs du *município* de Theobroma (figure 1), ne sont pas comptabilisés. La déforestation sur ces ranchs est pratiquée sur les espaces les plus étendus possibles. Elle est encouragée par le fait que celui qui déforeste une parcelle peut légalement réclamer cette parcelle. De plus, avec la menace de la réforme agraire, les entrepreneurs et spéculateurs ont joué sur les termes de la Constitution de 1988, qui spécifie que nul ne peut être exproprié si la terre est utilisée. Ainsi, le moyen le plus économique et le plus facile pour réclamer des droits de propriété sur la terre consiste à y installer des pâturages. Une fois obtenus, ces droits de propriété peuvent être vendus de façon formelle ou informelle, selon que le propriétaire a occupé cette terre suffisamment longtemps ou non pour que le titre soit définitif (MAHAR, 1989). Quoiqu'il en soit, la différence entre la valeur à la vente d'une parcelle déforestée



Photo 2. Abattis-brûlis de la forêt dans une parcelle destinée à la mise en culture, sur la route Yurinog-Tarapato, au Pérou.
Sash and burn applied to the forest in a parcel earmarked for cultivation, on the Yurinog-Tarapato road, in Peru.

et celle d'une parcelle en forêt reste importante, d'un rapport de 1 à 3 (figure 4). Cela est indépendant des qualités intrinsèques de la parcelle, car la fertilité des sols est faible et la productivité agricole décroît rapidement après l'abattage de la forêt. La valeur de la par-

celle est plutôt liée à la capacité d'attirer des revenus institutionnels, comme les crédits et les subventions. Ainsi, les gains élevés générés par la spéculation sur les zones de colonisation et de ranching constituent un important facteur de déforestation.

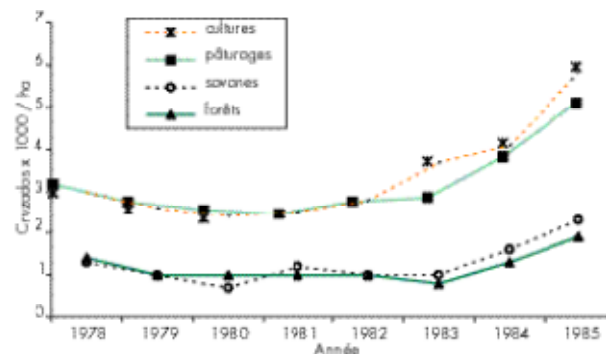


Figure 4. Evolution du prix moyen de la terre dans l'état de Rondônia. Source : MAHAR, 1989.
Development of the average price of land in the State of Rondônia. Source : MAHAR, 1989.

POPULATION ET DÉFORESTATION DANS LES UNITÉS ADMINISTRATIVES

MICRORREGIAOS

La figure 5 illustre la grande variabilité des densités de population des microrregiões, unités administratives englobant les municípios. La microrregião de Guajará-Mirim, une région éloignée située le long de la rivière Madeira, à la frontière de la Bolivie, avec peu de projets de colonisation mais beaucoup d'aires indigènes protégées, a la plus faible densité de population avec 1 habitant par km². A l'opposé, les microrregiões de Cacoal et de Ji-parana, les principales et les plus anciennes zones de colonisation le long de la route BR-364, ont les plus fortes densités de population avec 12 habitants par km². Dans les autres microrregiões, la densité de population varie autour de 4 habitants par km² mais la proportion de territoire déforesté peut varier de 8 à 32 %.

La microrregião de Porto Velho se singularise par son étendue (63 000 km²) et sa forte densité de population due à la ville de Porto Velho, capitale de l'État. La microrregião de Colorado do Oeste se distingue par une densité de popula-



Photo 3. Abattage d'une parcelle de forêt primaire destinée à une plantation de caféiers dans la commune de Theobroma, dans l'État du Rondônia, au Brésil.
Felling a parcel of primary forest earmarked for a coffee plantation in the commune of Theobroma, in the State of Rondônia, Brazil.

tion faible et une forte proportion de territoire déforesté due à la présence d'immenses ranchs. En excluant ces deux régions de la relation statistique, la déforestation et la densité de population des microrregiões sont très fortement corrélées positivement entre elles ($r^2 = 0,93$).

MUNICÍPIOS

À l'échelle plus fine des municípios, l'étude des évolutions démographiques est impossible car la majorité des municípios a été créée au cours de la colonisation de ces vingt

dernières années. De dix municípios en 1970, nous sommes passés à 25 en 1980, puis à 40 en 1994. Mais l'analyse de la variabilité des estimations de déforestation en 1993 (SEDAM-SEPLAN, 1996) et des estimations de population en 1994 (BGE, 1998) sur l'ensemble des municípios de Rondônia montre (figure 6) une grande dispersion ($r^2 = 0,60$).

En regardant plus en détail ces données, il apparaît que certains municípios ruraux, comme Corumbiara et Cabixi dans la microrregião de Colorado do Oeste, ont une déforestation plus importante que ce à quoi nous nous serions attendu et que ces municípios correspondent aux zones de colonisation les plus anciennes. Cela amène à penser que la relation entre la densité de population et la déforestation au niveau des municípios dépend de l'ancienneté de la colonisation, laquelle modifierait les stratégies d'occupation de l'espace des colons. Pour comprendre ces stratégies, il est indispensable d'aborder une échelle plus fine d'analyse, en différenciant les ranchs des petites exploitations agricoles.

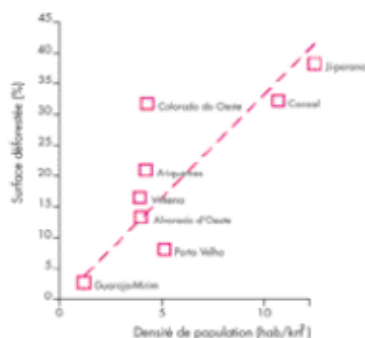


Figure 5. Relation entre la déforestation et la densité de la population sur l'ensemble des microrregiões de l'État de Rondônia. Source: BGE, 1998.
Relationship between deforestation and population density in all the microrregiões in the State of Rondônia. Source: BGE, 1998.

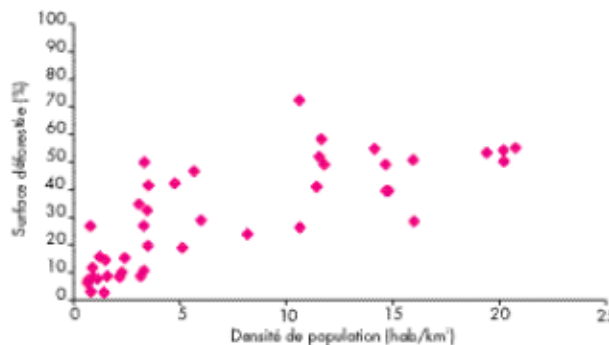


Figure 6. Relation entre la déforestation et la densité de la population sur l'ensemble des communes de l'État du Rondônia. Source : IBGE, 1998.
Relationship between deforestation and population density in all the communes in the State of Rondônia. Source: IBGE, 1998.

DEFORESTATION À L'ÉCHELLE DES EXPLOITATIONS AGRICOLLES

Dans le *município* de Theobroma, la déforestation sur les petites exploitations agricoles de 50 et 100 ha devient significative entre 1978 et 1987. En 1996, c'est plus de 66 % de la superficie de ces petites exploitations qui est déforestée, bien au-delà de la limite de 50 % à laquelle les colons s'étaient engagés vis-à-vis de la SUDAM. Sur les ranchs la déforestation n'est apparue qu'entre 1993 et 1994, pour atteindre en 1996 environ 35 % de la superficie totale du *município*.

Les propriétaires de ranchs ont donc attendu que la colonisation par les petits exploitants soit bien établie pour défricher à leur tour, alors à un rythme très rapide. À cela, les observations et enquêtes réalisées sur le terrain ont permis d'identifier les raisons suivantes.

- La plus grande disponibilité de main-d'œuvre salariée, les petits ex-

ploitants ayant déforesté leur propre parcelle.

- Le risque perçu par ces grands propriétaires d'une installation spontanée de nouveaux migrants à la périphérie de leurs ranchs.



Photo 4. Une exploitation agricole de migrants installés le long de la route Yurínogás-Tarapato.
A migrants' farm set up beside the Yurínogás-Tarapato road.

ANALYSE DU PROCESSUS

Pour analyser ces processus plus en détail, un échantillon de petites exploitations a été choisi sur les images satellitaires, puis les exploitations ont été classées par périodes de colonisation (première défriche sur la parcelle). Ces périodes de colonisation sur le *município* sont 1973-1978, 1978-1987 et 1993-1994. Aucune nouvelle parcelle n'a été déforestée durant 1987-1993 et 1994-1996. L'échantillon analysé comporte 48 exploitations de 100 ha chacune :

- 12 pour 1973-1978 ;
- 24 pour 1978-1987 ;
- 12 pour 1993-1994.

Chaque exploitation est caractérisée à chaque période par :

- le taux des superficies occupées par la forêt ;
- le type de route d'accès (secondaire ou tertiaire) ;
- la distance à la route goudronnée BR-364.

RÉSULTATS

Les résultats de cette analyse (figure 7) montrent que la proportion de terres déboisées sur les exploitations dépend de l'ancienneté de la colonisation. Le seuil de 50 % de déforestation sur les exploitations a été largement dépassé, tant sur les parcelles colonisées entre 1973 et 1978 (76 % de déforestation) que sur celles colonisées entre 1978 et 1987 (66 % de déforestation).

Enfin, les résultats montrent que les parcelles déforestées plus récemment, entre 1987 et 1996, sont situées beaucoup plus loin de la route principale BR-364 et qu'il existe, de ce fait, une relation étroite entre la proportion de terres déforestées et la distance à cette route principale (figure 7).

DISCUSSION

Comme nous l'avons souligné, la densité de population n'est pas le seul facteur explicatif de la déforestation et les stratégies d'occupation de l'espace des colons sont diverses.

A partir de l'analyse des différentes relations entre la population et la déforestation aux trois niveaux d'échelle : urbain/rural sur l'ensemble des microrégions de Rondônia, colonisation/ranching sur le *município* de Theobroma, et ancienneté/accès sur un échantillon de 40 exploitations, trois processus peuvent être identifiés.

- La colonisation par les petits agriculteurs. Ceux-ci déforêtent leur parcelle pour des cultures annuelles ou pérennes et des pâturages. Ce processus est variable selon l'ancienneté de la colonisation et l'éloignement de la route principale. Ces zones de colonisation sont caractérisées par une faible densité de population, inférieure à 4 habitants par km², et un taux annuel de déforestation d'environ 3 %.
- La spéculation sur les terres déforestées. Après la phase de colonisation, le processus de déforestation semble plus lié à la spéculation foncière des grands propriétaires de

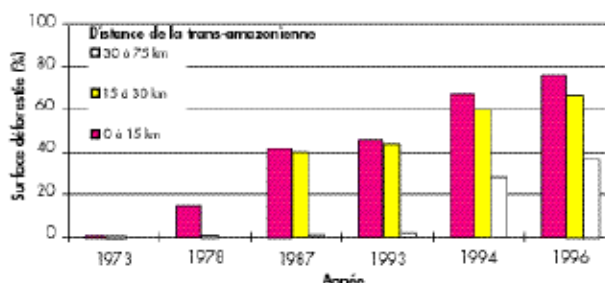


Figure 7. Relation entre la déforestation des parcelles et la distance à la route trans-amazonienne dans le district de Theobroma, entre 1973 et 1993.
Relationship between parcel deforestation and distance of access to the trans-Amazonian highway in the Theobroma district between 1973 and 1993.

ranchs et aussi des petits agriculteurs. Les petits agriculteurs ont par cette conversion la possibilité de réaliser des gains importants lors de la vente de leur parcelle. Les grands propriétaires de ranchs cherchent plutôt à occuper la terre pour obtenir des titres de propriété. Ces stratégies ont lieu dans les zones de colonisation les plus anciennes. La densité de population y varie entre 4 et 12 habitants au km² et le taux annuel de déforestation est d'environ

7 % sur les petites exploitations et de 4,5 % sur les ranchs (valeurs calculées sur le *município* de Theobroma). Sur les petites exploitations, ce processus de déforestation a toutes les chances de continuer jusqu'à 100 %, ce qui au rythme actuel devrait prendre moins de dix ans sur les zones de colonisation des années 70. Quant à la déforestation sur les ranchs, elle devrait continuer entre 10 et 20 ans pour arriver au même résultat.



Photo 5. Gardien d'un des immenses ranchs situés au nord de Theobroma.
A warden guarding one of the huge ranches lying to the north of Theobroma.

• La pénétration de la forêt par le réseau routier. Après la grande trouée du Rondônia par la route BR-364 dans les années 70, la colonisation a pénétré profondément dans la forêt par le réseau de routes secondaires et tertiaires, parfois à plus de 100 km de la route principale. Ces zones éloignées sont en relation étroite avec les centres urbains situés le long de la route principale, tant pour l'acheminement des produits que pour l'accès aux services et à l'administration. Le taux de déforestation dans ces zones est étroitement corrélé à l'éloignement.

CONCLUSION

Dans l'État du Rondônia, trois processus distincts de déforestation se combinent, donc, à des rythmes différents et à des échelles d'espace différentes :

- la mise en valeur agricole (cultures vivrières, cultures annuelles et élevage) par les petits agriculteurs sur les parcelles des zones de colonisation ;
- la spéculation foncière ;
- l'extension des réseaux routiers pour pénétrer dans la forêt et coloniser l'espace forestier.

Les articulations entre les échelles de temps et d'espace sont mises en évidence grâce à l'utilisation conjointe de données satellitaires sur l'occupation des sols et de données de recensement. L'analyse conjointe de ces données met en relief la dimension sociale des états et des changements observés.

Il est entendu qu'en nous appuyant presque exclusivement sur l'utilisation d'images satellitaires, l'étude ne permet pas d'explicitier tous les mécanismes de la déforestation sur le front pionnier. De nombreuses questions restent en suspens : quel est le marché foncier et ses bénéficiaires ? Quelles sont l'origine et les activités des urbains ? Quel est le devenir de la force de travail des migrants ? Quelle est la stratégie à long terme des propriétaires de ranchs ?... Toutes ces questions ne pouvaient être analysées dans cette seule étude, mais elles sont apparues essentielles pour expliciter mieux que nous l'avons fait les relations entre la déforestation et la population au Rondônia.

Au vu de la dynamique des paysages et des mutations sociales que nous avons observées, il fait toute-

fois peu de doutes que, durant les prochaines décennies, la population totale du Rondônia va augmenter sensiblement et que la déforestation se poursuivra de manière significative. Il est probable aussi que le processus d'urbanisation continuera de s'amplifier.

Pour ces raisons, la comparaison avec l'État du Mato Grosso, situé au sud du Rondônia, mériterait d'être faite. Comme cela s'est passé là 20 à 30 ans plus tôt, l'agriculture devrait s'orienter vers une économie de marché et, en particulier, vers l'exportation. La culture mécanisée du soja sur de grandes exploitations, qui s'était développée rapidement au Mato Grosso dans les années 70 et 80, s'étend d'ores et déjà sur les terres des grands ranchs du sud du Rondônia. Ce processus pourrait s'étendre à l'ensemble de l'État. Et ces évolutions probables dans l'utilisation des terres vont sans doute rendre plus complexes encore les relations entre la déforestation et la pression démographique.

► Jacques IMBERNON
CIRAD/TERA
34398 MONTPELLIER Cedex 5
France

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ALLEN J.C., BARNES D.F., 1985.
The causes of deforestation in developing countries. *Annals of the Association of American Geographers* 75 : 163-184.
- BECKER B.K., 1996.
Undoing myths: the Amazon, an urbanized forest. In : *Brazilian perspectives of sustainable development of the Amazon region*. Man and the Biosphere series 15 (chap. 4), Unesco, Paris, France, 53-89.
- BOISSAU S., 1998.
Unifier Malthus et Boserup ? L'exemple de la relation population-forêts. Mémoire de DEA, Ecole des Hautes Etudes en Sciences Sociales, Paris, France, 106 p.
- FEARNSIDE P.M., 1986.
Human carrying capacity of the Brazilian rainforest. New York, Etats-Unis, Columbia University Press, 187 p.
- FUJISAKA S., THOMAS N., CRAWFORD E., 1996.
Deforestation in two Brazilian Amazon colonies: analysis combining farmer interviews and GIS. Cail, Colombie, Centro Internacional de Agricultura tropical (CIAT), 13 p.
- HECHT S.B., 1993.
The logic of livestock and deforestation in Amazonia. *Bioscience* 43 (10) : 687-695.
- IBGE (Instituto Brasileira de Geografia e Estatística), 1998.
Monografia Rondônia, Porto Velho, Rondônia, Brésil, 58 p.
- MAHAR D.J., 1989.
Government policies and deforestation in Brazil's Amazon region. World Bank, Washington DC, Etats-Unis, 56 p.
- MORAN E.F., 1993.
Deforestation and land use in the Brazilian Amazon. *Human Ecology* 21 (1) : 1-21.
- SEDAM-SEPLAN, 1996.
Rondônia: anuário estatístico agropecuario 1995. Secretário de Estado do Planejamento e Coordenação Geral, Rondônia, Brésil, 177 p.
- SKOLE D.L., CHOMENTOWSKI W.H., SALAS W.A., NOBRE A.D., 1994.
Physical and human dimension of deforestation in Amazonia. *Bioscience* 44 (5) : 314-338.

R É S U M É

DÉFORESTATION ET PRESSION DÉMOGRAPHIQUE AU RONDÔNIA, BRÉSIL

L'Amazonia brésilienne est depuis plus de 20 ans le théâtre d'une rapide conversion de la forêt tropicale humide à l'agriculture. Cette déforestation est liée à l'arrivée de migrants et à la réalisation d'infrastructures routières, toutes deux soutenues par des programmes volontaristes de colonisation. Entre 1950 et 1996, la population a augmenté de 330 %. Mais la densité de population n'est pas le seul facteur explicatif de la déforestation. En effet, diverses stratégies d'occupation de l'espace des colons justifient l'importance des défrichements. Dans l'État du Rondônia, trois processus distincts de déforestation se combinent, à des rythmes et à des échelles d'espace différents : la mise en valeur agricole (cultures vivrières, cultures annuelles et élevage) par les petits agriculteurs sur les parcelles des zones de colonisation, la spéculation foncière, l'extension des réseaux routiers pour pénétrer dans la forêt et coloniser l'espace forestier. Les articulations entre les échelles de temps et d'espace sont mises en évidence grâce à l'utilisation conjointe de données satellitaires sur l'occupation des sols et de données de recensement. L'analyse conjointe de ces données met en relief la dimension sociale des états et des changements observés.

Mots-clés : colonisation, déforestation, Amazonie, Brésil.

A B S T R A C T

DEFORESTATION AND POPULATION PRESSURE IN THE STATE OF RONDONIA, BRAZIL

For more than 20 years, Brazilian Amazonia has been the site of a rapid conversion of rain forests by farming. The resulting deforestation is associated with the arrival of migrants and the construction of roads and thoroughfares, both supported by determined settlement programmes. Between 1950 and 1996 the population rose by 330%. But population density is not the only factor behind this deforestation. Various land-use strategies adopted by settlers actually justify the scale of land clearance. In the State of Rondonia, there are three distinct deforestation processes, occurring at different paces and on different spatial scales: the development of farming (subsistence crops, annual crops and livestock rearing) by small farmers on land parcels in settlement zones, land speculation, and the extension of road networks to penetrate further into the forest and settle forested areas. Links between time and space scales are demonstrated by the joint use of satellite data about land use and census data. A combined analysis of these data brings to the fore the social dimension of the conditions and changes observed.

Key words: settlement, deforestation, Amazonia, Brazil.

R E S U M E N

DEFORESTACIÓN Y PRESIÓN DEMOGRÁFICA EN RONDÓNIA, BRASIL

La Amazonia brasileña es desde hace más de veinte años el escenario de una rápida conversión del bosque tropical húmedo por la agricultura. Esta deforestación está vinculada a la llegada de colonos emigrantes y a la realización de infraestructuras de carreteras, ambos procesos sustentados por programas voluntaristas de colonización. Entre 1950 y 1996, la población aumentó un 330%. Pero la densidad de población no es el único factor para explicar la deforestación. En efecto, diversas estrategias de ocupación del espacio por los colonos justifican la importancia de los desmontes. En el Estado de Rondônia se combinan tres procesos diferentes de deforestación, con distintos ritmos y en escalas espaciales diferentes: el aprovechamiento agrícola (cultivos alimentarios, cultivos anuales y ganadería) por los pequeños agricultores en las parcelas de las zonas de colonización, la especulación sobre el valor de la tierra y la extensión de las redes de carreteras para penetrar en la selva y colonizar el espacio forestal. Se ponen en evidencia las articulaciones entre las escalas de espacio y tiempo gracias a la utilización conjunta de datos de satélites sobre la ocupación de suelos y de datos del censo. El análisis conjunto de estos datos muestra claramente la dimensión social de las situaciones y cambios observados.

Palabras clave: colonización, deforestación, Amazonia, Brasil.

SYNOPSIS

DEFORESTATION AND POPULATION PRESSURE
IN THE STATE OF RONDONIA, BRAZIL

JACQUES IMBERNON

For more than 20 years, the forests of Brazilian Amazonia have been subject to rapid conversion by farming. This deforestation is, to a large extent, associated with the arrival of migrants and population growth is still the factor most frequently advanced to explain the deforestation process. But the relationship between deforestation and population pressure is a complex one. It is analyzed here in one of the most settlement-exposed areas of Brazilian Amazonia, the State of Rondonia, using high resolution satellite imagery and population censuses.

URBAN POPULATION
AND RURAL POPULATION

Between 1950 and 1996, the total population of Rondonia rose from 36 935 to 1 221 290 inhabitants, i.e. an increase of 330% in 45 years. This boom occurred mainly in the 1970s and the 1980s, when settlement programmes were implemented by the government. Between 1970 and 1980 population growth figures were in excess of 10%, be it in urban or rural zones. So the urbanization process in Rondonia, which we can observe, has gone hand in glove with the establishment of farms. At the present time, in addition to the fact that more migrants are heading to urban centres than to rural areas, urban centres are also absorbing the surplus of rural labour which has been created following forest felling operations resulting from settlement projects.

SETTLEMENT AND RANCHING

For the 46% of deforested land, the 1996 statistics in the *município* of Theobroma give 26% pastureland, 8% fallow, 7% annual crops and 5% crops. Pastureland

thus predominates in settlement areas. The census data of the State of Rondonia over the period 1970-1985 show that the area of pastureland here is higher than the sum of the areas of all the other crops; it accounts for two-thirds of farmland. During this same period, huge ranches of more than 10 000 hectares have been deforested over as large an area as possible, encouraged by the fact that the person who deforests a parcel of land may legally claim that parcel. Lastly, be it in settlement areas or ranching areas, the difference between the sale price of a deforested parcel and a forested parcel is still considerable, with a ratio of 1:3. This has given rise to intense land speculation and considerably contributed to deforestation.

POPULATION AND DEFORESTATION
IN ADMINISTRATIVE UNITS

Population densities in the *microrregiões* – administrative units which encompass the *municípios* – range from one to twelve people per km² and the proportion of deforested land may vary from 8 to 32%. But deforestation and population density in the *microrregiões* are very closely correlated ($r^2 = 0.93$). On the smaller scale of the *municípios*, it is impossible to examine population developments because most of the *municípios* were created during the settlement process of the last 20 years. But an analysis of the variability of deforestation estimates in 1993 and population estimates in 1994 for all the *municípios* of Rondonia show a marked dispersion ($r^2 = 0.60$). It would also appear that the relationship between population density and deforestation at *município* level depends on how long ago

settlement occurred, for this alters the settler's land use strategies.

DEFORESTATION ON FARMS

In the *município* of Theobroma, there was significant deforestation on small farms of 50 to 100 hectares between 1978 and 1987. In 1996, more than 66% of the area of these small farms was deforested, so well above the 50% limit. On ranches, deforestation occurred later, between 1993 and 1994, and in 1996 affected about 35% of the total area of the *município*. So ranch owners waited until settlement by small farmers was well established in order to in turn clear land at a very rapid rate. To analyze the deforestation on small farms in greater detail, a sample of 48 100-hectare farms was selected from satellite images and categorized by settlement period. The findings show that the proportion of deforested land on farms depends on how long ago settlement occurred; they also show that the 50% deforestation threshold was considerably exceeded on parcels settled between 1973 and 1978 (76% deforestation) and between 1978 and 1987 (66% deforestation).

Lastly, the findings show that there is a close relationship between the proportion of deforested land and the distance to the main road.

So, an analysis of the different relationships between population and deforestation helps to identify three processes: settlement by small farmers, speculation on deforested land, and forest penetration by the road system. This analysis sheds light on the links between time and space scales and the social dimension of changes observed in Amazonia.

2.2.3 Analyse quantitative de motifs de paysages de déforestation

Imbernon J., Branthomme A., 2001. Characterization of landscape patterns of deforestation in tropical rain forests. *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, n° 9.

INT. J. REMOTE SENSING, 2001, VOL. 22, NO. 9, 1753–1765



Characterization of landscape patterns of deforestation in tropical rain forests

J. IMBERNON and A. BRANTHOMME

CIRAD, BP 5035, 34032 Montpellier, France; e-mail: imbernon@cirad.fr

(Received 10 April 1998; in final form 14 December 1999)

Abstract. Patterns due to clearance and cultivation in the tropical rain forest are analysed and interpreted using high resolution remote sensing data. Within a wide variety of pattern indices, some are selected on statistical criteria to enable a cross-site comparison over different sites around the tropical belt and to monitor the landscape dynamics on one of them. The in-site variability of these indices is analysed to identify several landscape patterns of distinct land uses and to stratify the image on different landscape patterns. A cross site comparison reveals high differences of deforestation patterns between sites in terms of landscape configuration and complexity, of distribution and isolation of patches, and of degree of fragmentation. And the monitoring of landscape dynamic on a Brazilian site shows tremendous changes over the last 25 years and landscape pattern indices help to identify trends and quantify landscape changes: percentage forest decreases with forest cover, while Matheron index increases with fragmentation of landscape and fractal index increases with complexity of landscape pattern. Thus landscape pattern indices provide useful quantification to better analyse in-site variability, cross site comparison and changes over time.

1. Objectives

Landscape level research requires methods to quantify spatial composition and organisation in order to compare landscapes, identify significant differences and determine relationships of functional processes to spatial characteristics. Many methods are based on texture analysis using Fourier transforms (Seyler *et al.* 1998) or wavelet transforms (Zhu and Yang 1998), or on spatial statistics, as spatial dependence (Wulder and Boots 1998). But the methods developed by landscape ecology, largely founded on the patterning of landscape elements (patches) and therefore able to quantify landscape structure as spatial composition and organisation (Forman and Godron 1986, Turner and Gardner 1995), remain of great interest to the study of landscape function and change, and also the cross-comparison between various landscapes of tropical deforestation.

Within the different types of spatial processes—perforation, fragmentation, shrinkage and attrition—forest fragmentation is probably the process where man is most active, and is a major issue to study deforestation. In addition to forest cover loss, fragmentation has a great impact on biodiversity (Skole and Tucker 1993), increasing isolation of habitats, endangering species of mammals and birds, modifying population dynamics. TREES project 1995 (Tropical Ecosystem Environment

Observation by Satellite project) has classified the main forest fragmentation types into four primary classes: linear, insular, diffuse and massive.

Thus to get landscape metrics to quantify the structure of the landscape and the spatial processes within designated landscapes appears of major interest. A number of landscape configuration metrics can be formulated either in terms of the individual patches or in terms of the whole landscape, depending on the emphasis sought. For example, fractal dimension is a measure of shape complexity that can be computed for each patch and then averaged for the landscape, or it can be computed from the landscape as a whole. In addition, there are some landscape metrics that clearly represent pattern complexity but are not spatially explicit at all. These metrics vary as a function of the heterogeneity of the landscape, but do not depend explicitly on the relative location of patches within the landscape or their individual spatial character. For example, total edge or edge density is a function of the amount of border between patches.

The objective of this study is to analyse and interpret patterns of deforestation due to slash-and-burn cultivation in the tropical rain forest using remote sensing data (Imbernon 1996, 1999). As landscape patterns are complex and heterogeneous, a wide variety of metrics are necessary to measure different aspects of the patterns (Turner and Gardner 1990). To enable a cross-site comparison around the tropical belt and to monitor the landscape dynamics on one of these sites, some pattern indices have been selected on statistical criteria (Branthomme 1997). At last, these indices are analysed in relation to both the patch mosaic within the landscape as well as the landscape context, and they are linked to the current deforestation processes.

2. Materials and method

A large number of landscape configuration metrics can be formulated using appropriate software, either in terms of the individual patches or in terms of the whole landscape. To address our objectives for characterisation and monitoring of deforestation landscapes, the various landscape pattern indices have to be screened statistically to eliminate high-correlation between each other and low intra-site variance.

The method was applied on satellite images over different ASB sites located within the major humid forest basins: Theobroma (Rondonia) and Pedro Peixoto (Acre) in the Brazilian Amazon, Pucallpa (Ucayali) and Yurimaguas (Loreto) in Peruvian Amazon, Yaounde and Ambam (Cameroon) in central Africa and Lampung (Sumatra, Indonesia) in south-east Asia (The Alternatives to Slash-and-Burn project is a system-wide initiative of the Consultative Group on International Agricultural Research (CGIAR), co-ordinated by the International Centre for Agroforestry (ICRAF), and supported by the Global Environment Facility (GEF)). These different sites are in different context: large scale colonisation projects, and high deforestation rates in Theobroma and Pedro Peixoto; small scale spontaneous colonisation and low deforestation rates in Pucallpa, Yurimaguas and Ambam; small scale spontaneous colonisation and high deforestation rates around the city of Yaounde; massive deforestation by agro-industrial plantations and transmigration settlements in Lampung.

Only the most recent Spot-XS images, from the year 1996 (except for Yurimaguas and Mbalmayo which were from 1995), were used in order to obtain a consistent set of data. These images had already been processed (Imbernon 1996, 1999) using

the same method: an unsupervised classification with 200 classes, followed by an interactive photo-interpretation using ground control points located with a Global Positioning System. These classified images were then recoded as forest, crop land and others. Forest represents primary and secondary forest, crop land covers cultivated land and fallow, and others includes clouds, shadows, water and urban areas. Then a subset image of $48\text{ km} \times 48\text{ km}$ was taken on each of these images. And these subsets were split as 6×6 grid-cells of $8\text{ km} \times 8\text{ km}$ each in order to analyse the internal variability of landscapes (figure 1).

For monitoring landscape pattern changes over time, we were not able to get a consistent data base. We used six images over 1973–1996 period: Landsat MSS (1973, 1978, 1987), Landsat TM (1993, 1994) and SPOT XS images (1996), over Theobroma (Brazil). The Landsat images were resampled to a 20m resolution. The

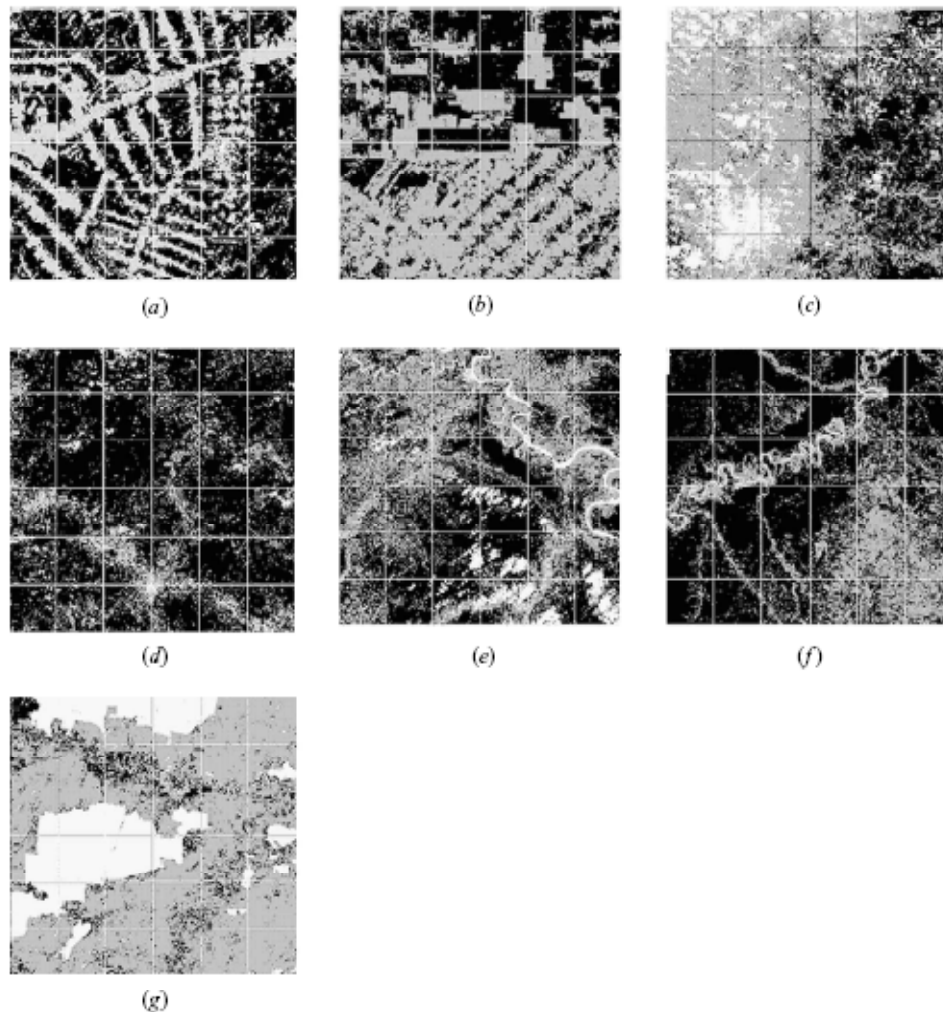


Figure 1. Land cover of Pedro Peixoto (a) and Theobroma (b) in Brazil, Yaounde, (c) and Ambam, (d) in Cameroon, Yurimaguas, (e) and Pucallpa, (f) in Peru and Lampung, (g) in Indonesia (from SPOT images).

smallest patches (less than 5 pixels) were removed from all the images (figure 2) using Imagine software (ERDAS). However this heterogeneity in data quality remains a difficult point for a quantitative characterization of landscape patterns. Finally, we stratified these images into two different areas: small farms and big ranches by a visual interpretation of the 1996 image, in order to quantify and analyse specific dynamics (figure 3).

To calculate landscape pattern indices, we used the software FRAGSTATS (McGarical *et al.* 1994, Berry *et al.* 1998). It enables the calculation of many different types of indices: area, density, size and variability, edge, shape, core area, distance to nearest neighbour and diversity. These indices can be calculated on each patch, on each class and on the total area. For the cross-site comparison, we only considered indices on forest and crop land classes, on the individual cells and on the total area. For the monitoring of landscape dynamics, the analysis was of the stratified units and on the total area.

Using FRAGSTATS we obtained 61 indices which is too many to manage. So we tried to select only a few of them to characterize the deforestation landscapes on the images. The screening was made following different steps. First a matrix of correlation was built with all the indices and when correlation was very high (greater than 0.9) one index was removed. Then graphs of variations between sites were drawn index by index: the indices with very few difference between sites on these graphs were removed. Finally similar indices were removed using a Variance Analysis and an *F*-test, with *F* varying from 115.35 (number of crop land patches) to 4.81, applying the lowest significant difference (LSD) method:

$$\text{LSD} = t_{0.05/2}(2n-2)\sqrt{(2SW/n)} \quad (1)$$

where *n*=number of samples, *SW*=intra-site variance, to identify indices which discriminate better between the sites (table 1).

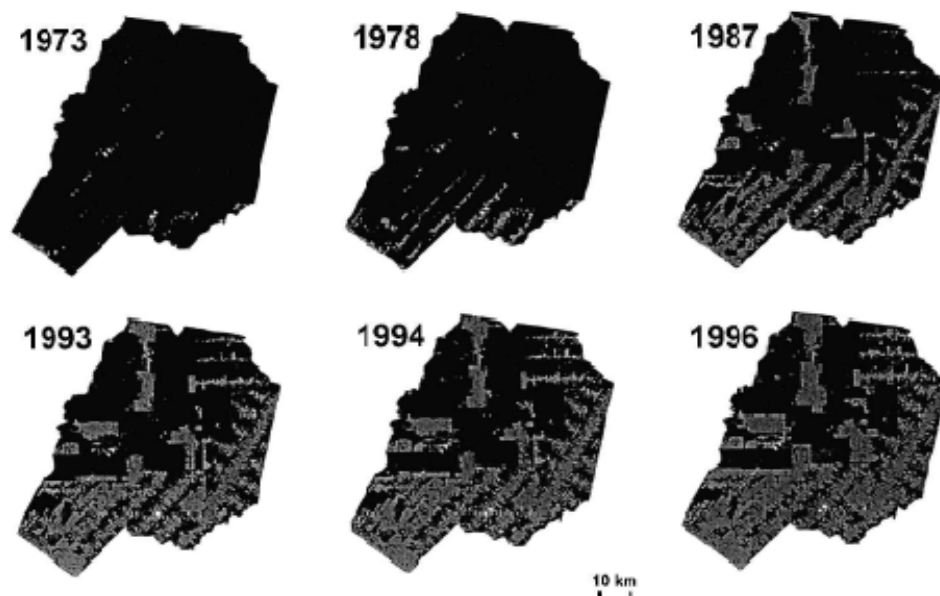


Figure 2. Land cover change on the district of Theobroma-Brazil.



Figure 3. Stratification of Theobroma district into two different areas.

Table 1. Indices remaining after the Variance Analysis.

1 Number of crop land patches	7 Fractal dimension of forest patches
2 Fractal dimension of all the patches	8 Forest patch size standard deviation
3 Total number of patches	9 Mean proximity between forest patches
4 Mean distance between patches and their nearest neighbour	10 Mean crop land patch size
5 % forest area	11 Mean forest patch size
6 Fractal dimension of crop land patches	12 Landscape shape (Patton index)

In the end six indices were selected: number of crop land patches, fractal dimension of all patches, mean distance between patches and their nearest neighbour, percentage forest area, mean proximity between forest patches and mean crop land patch size. The Matheron index, a core/perimeter ratio which is currently used by TREES project (1995) was added. These seven indices were then used for cross-site comparison, on-site variability study and monitoring of landscape dynamics (table 2).

3. In-site variability

The different images have a certain internal landscape variability and several landscape patterns corresponding to distinct land uses can be observed. Thus indices calculated on the whole image could have less meaning and it could be important to identify the different landscapes present within an image. For this study the 6×6

Table 2. Landscape indices selected and their range of values.

Index	Type of index	Min.		Max.	
Number of crop land patches	Density and size	106	Lampung	881	Yurimaguas
Fractal dimension of all patches	Shape	1.27	Pedro Peixoto	1.4	Yurimaguas
Mean distance between patches and nearest neighbour	Nearest neighbour	49.9	Yurimaguas	112.1	Pedro Peixoto
% forest area	Area	86.6	Ambam	30.7	Yaounde
Mean proximity between forest patches	Nearest neighbour	767	Lampung	64 392	Ambam
Mean crop land patch size	Density and size	1.4	Ambam	117.7	Lampung
Matheron Index	Shape	9.3	Pedro Peixoto	35.5	Lampung

grids were used. We however have to bear in mind that the indices were selected in order to minimize the internal variance and to maximize the cross-site variance.

Variability has been described for each of the sites, and table 3 is an example of this for the sites of Lampung and Ambam. The indices have been calculated within grid-cells. Their variability could be quite high.

The different indices represented on the grid (figure 4) show the internal variability of the landscape patterns, with different pattern types. This is a way of stratifying the image on different landscape patterns. The indices of the different landscape patterns identified within the Lampung and Ambam images are described in tables 4 and 5. The stratification of landscape patterns on the different sites is as follows:

- *Pedro Peixoto* (figure 5(a)). Pattern 1 is mainly forest (80 to 95% of the area). Pattern 2 is along the trans-amazonian road, where crop land patches are over 20 ha on average. Pattern 3 is along secondary roads, with a smaller mean size of crop land patches and a higher forest proportion. Pattern 4 is along tertiary roads where the mean size of crop land patches are even smaller. The other indices show a relative homogeneity of fragmentation and composition of the landscape of this site. This site is shaped by road network.
- *Theobroma* (figure 5(b)). Pattern 1 is located South of the image, with large crop land patches and fragmented forest. Pattern 2 is in the northern half of the image, characterized by a large number of crop land patches and a low Matheron index. Pattern 3 is in the north-west and has smaller crop land patches than pattern 2. This site shows two very different land uses.
- *Yaounde* (figure 5(c)). Pattern 1, around Yaounde, is basically crop land with very fragmented forest patches. Pattern 2 is mainly forest with many small crop land patches. Pattern 3 is savannah, forest and crop land all occurring together, with a high fractal index. Pattern 4 is in between forest area and crop land area and pattern 5 is savannah and crop land mixed with little forest.

Figure 4. In-site variability of different indices on Ambam-Cameroon. (a) Land cover map, (b) number of crop land patches, (c) fractal dimension of all the patches, (d) mean crop land patch size, (e) Matheron index, (f) % forest area, (g) mean distance between patches and nearest neighbour, (h) mean proximity between forest patches.

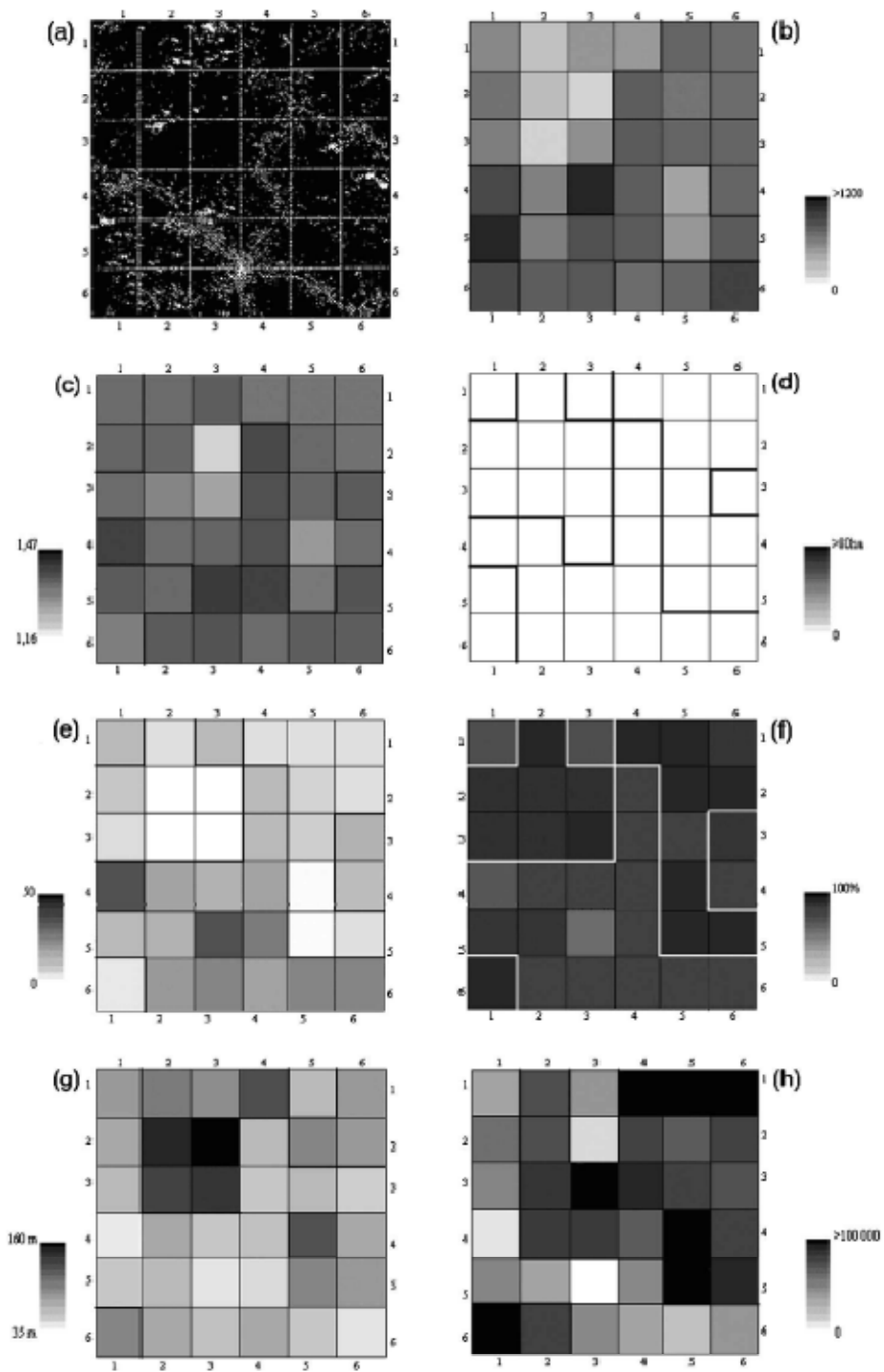


Table 3. In-site variability of landscape pattern indices of Lampung and Ambam.

Index	Lampung		Ambam	
	mean	CV (%)	mean	CV (%)
Number of crop land patches	106	90.7	522	28.5
Fractal dimension of all patches	1.40	3.6	1.31	1.5
Mean distance between patches and their nearest neighbour	67.5	26.4	86.1	29.1
% forest area	13.8	72.4	86.7	8.9
Mean proximity between forest patches	767	270.1	64392	49.0
Mean crop land patch size	117.8	171.5	1.4	54.5
Matheron index	11.2	17.2	35.7	41.5

Table 4. Variability of landscape pattern indices over grid-cells in Lampung.

Index	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3
Number of crop land patches	2–130	100–400	< 50
Fractal dimension of all patches	1.40–1.41	1.42–1.45	1.30–1.42
Mean distance between patches and their nearest neighbour	60 m–90 m	40 m–60 m	70 m–110 m
% forest area	< 5%	20%–40%	3%–12%
Mean proximity between forest patches	120–120	200–12200	8–300
Mean crop land patch size	10 ha–25 ha	4 ha–20 ha	80 ha–860 ha
Matheron index	21–30	35–45	30–40

Table 5. Variability of landscape pattern indices over grid-cells in Ambam.

Index	Pattern 1	Pattern 2	Pattern 3
Number of crop land patches	210–450	400–710	450–910
Fractal dimension of all patches	1.24–1.30	1.31–1.35	1.29–1.32
Mean distance between patches and their nearest neighbour	85 m–150 m	55 m–85 m	65 m–95 m
% forest area	> 95%	65%–85%	85%–95%
Mean proximity between forest patches	73 000–138 000	17 000–90 000	500 000–1 000 000
Mean crop land patch size	< 1 ha	1.5 ha–4 ha	0.5 ha–1.5 ha
Matheron index	3–7	> 11	7–13

- *Ambam* (figure 5(d)). Pattern 1 is forest (over 95%) with very small and widely dispersed crop land patches. Pattern 2 is the crop land area along the roads, with crop land patches relatively large and numerous. Pattern 3 is intermediate, with many crop land patches distributed within forest. This site is shaped by roads but it is relatively homogeneous.
- *Yurimaguas* (figure 5(e)). Pattern 1 is along the rivers and close to Yurimaguas town. It is mainly a crop land area, with very fragmented forest patches. Pattern 2 is in remote areas, far from rivers and towns, with a diffuse fragmentation and small crop land patches isolated within the forest. Pattern 3 is intermediate, with higher fractal dimension and a lower index of nearest neighbour than pattern 2.
- *Pucallpa* (figure 5(f)). Pattern 1 is along the Frederico-Basadre road, forest

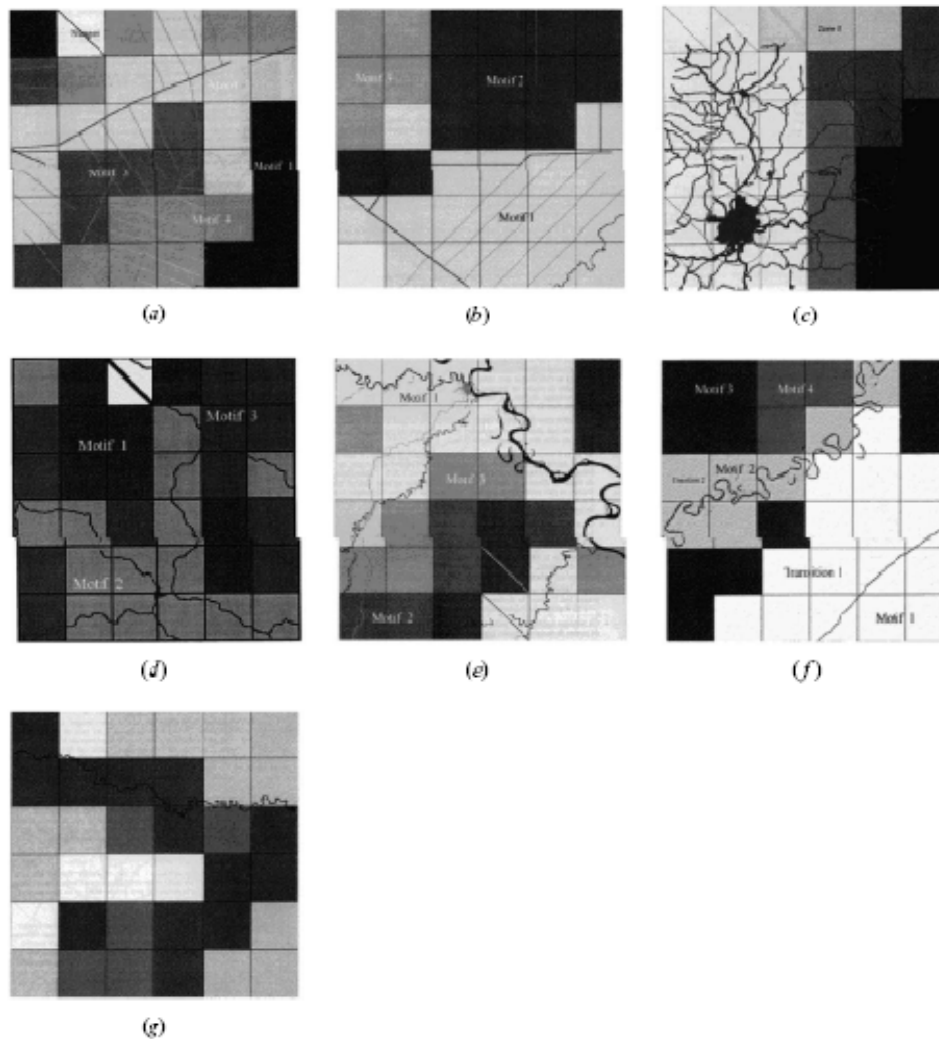


Figure 5. In-site variability of landscape pattern indices on Pedro Peixoto (a) and Theobroma, (b) in Brazil, Yaounde, (c) and Ambam, (d) in Cameroon, Yurimaguas, (e) and Pucallpa, (f) in Peru and Lampung, (g) in Indonesia. Motif= pattern.

cover is low and fragmented, and patches of crop land are large measuring over 15 ha. Pattern 2 along the Aguaytia river is characterised by a great fractal dimension, a larger forest cover and smaller crop land patches. Patterns 3 and 4 are mainly forest: with very small crop land patches measuring less than 2 ha for pattern 3 and a fragmented crop land area with many crop land patches for pattern 4. This stratification shows the effects of the river and the road on land use intensity. In more remote areas, space is quite unoccupied.

- *Lampung* (figure 5(g)). Pattern 1 is plantations. Pattern 2 is characterized by fragmented forest. Pattern 3 is crop land with very little forest. Pattern 4 is crop land with more forest patches along rivers.

4. Cross-site comparison

- The number of crop land patches stands out for two sites: Yurimaguas and Ambam, with 30 000 and 18 000 patches respectively. On the other side of the scale, Lampung has only 3500 patches. Pedro Peixoto, Theobroma, Pucallpa and Yaounde are intermediate and cannot be differentiated. This index characterizes the landscape configuration, particularly its spatial heterogeneity.
- The fractal dimension of all patches is highest for Lampung and Yurimaguas and lowest for Pedro Peixoto. Ambam, Yaounde, Pucallpa and Theobroma are intermediate. This index characterizes the complexity of landscape.
- The mean distance between all patches and their nearest neighbour is highest for Pedro Peixoto and lowest for Yurimaguas and Lampung. The other sites are similar. This index indicates the isolation and distribution of patches.
- The percentage forest area is 87% and 74% for Ambam and Pucallpa respectively, 65% and 61% for Pedro Peixoto and Yurimaguas, 50% for Theobroma, and 31% and 14% for Yaounde and Lampung. This index indicates the presence and quantity of the forest cover.
- The mean proximity between forest patches is highest for Lampung and Yaounde and lowest for Ambam. The other sites are very similar. This index indicates the degree of isolation and fragmentation on patches.
- The mean crop land patch size is highest for Lampung with 40 ha and lowest for Ambam and Yurimaguas with 1.5 ha and 2.2 ha respectively. Pucallpa, Theobroma, Pedro Peixoto and Yaounde have near similar values ranging between 6 ha and 14 ha. This index gives information on fragmentation.
- The Matheron index is highest for Lampung and Yurimaguas with 32 and 27 respectively. Yaounde has also a high index value (19). The other sites have near similar values ranging between 8 and 13. This index characterizes the degree of fragmentation.

Thus this cross-site comparison reveals high differences of deforestation patterns between sites. In Yurimaguas, deforestation occurs around the town and along rivers. At a certain distance from these, it becomes scattered in many small patches. On the whole image, the deforestation pattern is diffuse. In Pucallpa, the same pattern is visible along rivers and roads. In Rondonia, two patterns have been identified: crop land along roads and a more forested area with very large deforestation patches. In Acre, patterns are regular with successively large crop land areas and large forest areas. In Yaounde, different patterns have been noted: an entirely deforested area around Yaounde, a forested area, and savannah area. Ambam has a diffuse pattern, with crop land patches distributed along roads. In Lampung, a few forest patches remain along rivers, and landscape is shaped by very large agro-industrial plantations.

5. Monitoring of landscape dynamics

Land cover changes over time in Theobroma district have been tremendous over the last 25 years (figure 2). In 1973, the whole area was covered by forest, except for some small crop land patches along the main road. In 1978, crop land areas appeared along secondary roads—the beginning of colonization. In 1987, the landscape already had its skeleton: colonization by 'small' farms along roads producing a 'fishbone' pattern (Moran 1993, Wood *et al.* 1996) and some large deforested areas in the upper part of the image corresponding to big ranches. 1993, 1994 and 1996 images show the consequent expansion of these skeleton of deforested areas.

For the quantitative characterization of landscape pattern dynamics we used similar indices as these of the cross-site comparison. This analysis has been performed on the two landscape pattern areas that we will call 'farm area' (southern area) and 'ranch area' (northern area) (table 6) (figure 6).

Table 6. Changes of landscape pattern indices between 1973 and 1996 on Theobroma district (Rondonia, Brazil).

	1973	1978	1987	1993	1994	1996
Number of crop land patches	13 (13, 0)	107 (103, 4)	472 (376, 117)	748 (520, 272)	1048 (652, 451)	1659 (833, 887)
Fractal dimension of all patches	1.14 (1.17, 1.08)	1.24 (1.26, 1.13)	1.36 (1.37, 1.32)	1.40 (1.40, 1.38)	1.41 (1.40, 1.40)	1.40 (1.38, 1.44)
Mean distance between crop land patches and their nearest neighbour	1431 (—, 1431)	383 (200, 6110)	101 (102, 144)	66 (66, 99)	91 (73, 114)	101 (68, 133)
% forest	99 (99, 100)	96 (94, 99)	78 (68, 91)	66 (53, 82)	63 (49, 78)	55 (41, 71)
Mean forest patch size	55086 (29499, 76763)	909 (488, 15308)	87 (49, 247)	42 (23, 100)	36 (20, 80)	25 (14, 50)
Matheron index	4.84 (2.55, 1.59)	10.83 (5.99, 1.76)	44.97 (23.86, 5.84)	74.55 (39.01, 10.76)	87.19 (44.15, 13.93)	100.97 (48.31, 19.41)

Figures in brackets are indices on southern and northern area of Theobroma district respectively.

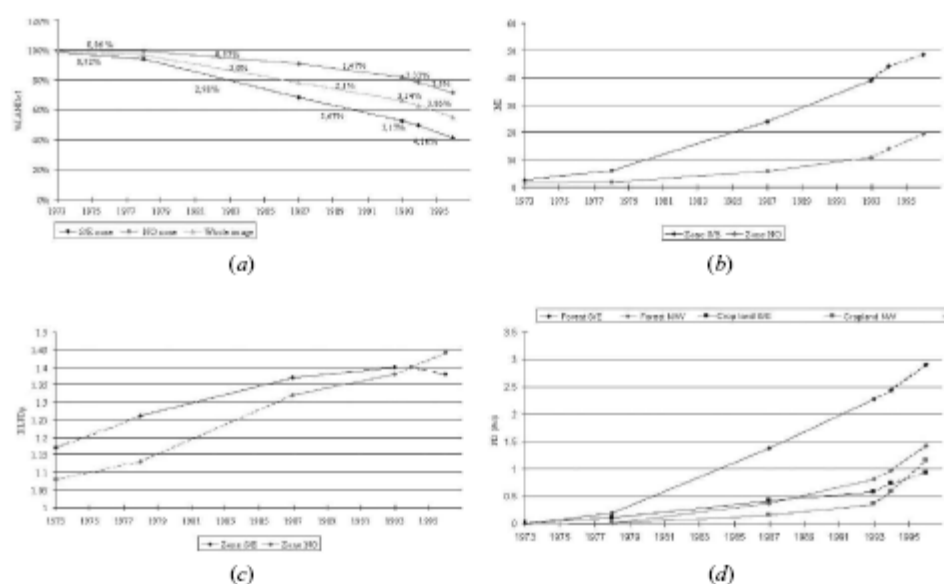


Figure 6. Changes over time of landscape pattern indices in Theobroma district: (a) % forest, (b) Matheron index, (c) fractal dimension, (d) patch size.

- The number of crop land patches increased dramatically between 1973 and 1996. From 13 patches of crop land on the 'farm area' in 1973, the number multiplied ten times in 1978, then multiplied 3 times in 1987. It continued to increase but at a lower rate. On the 'ranch area' the number of crop land patches was null in 1973. It increased slowly between 1973 and 1987, and faster between 1987 and 1993. Later, as the difference in spatial resolution could have a large effect on the number of patches, the 1994 Landsat TM image and 1996 SPOT XS image were not taken into account.
- The fractal dimension of all patches increased rapidly between 1973, 1978 and 1987, and later more slowly. The landscape became more complex.
- The mean distance between crop land patches and their nearest neighbour was very high in 1973 (1500 m for farm area and 6000 m for ranch area) and then decreased to nearly zero in 1978 for the 'farm area' and in 1993 for the 'ranch area'. The crop land patches have become increasingly less isolated.
- The percentage forest area on the 'farm area' decreased from 98.6% in 1973 to 68% in 1987 and 40.2% in 1996. On the 'ranch area' it decreased from 100% in 1973 to 91% in 1987 and 71.4% in 1996. It appears that the deforestation process started later on the 'ranch area' than on the 'farm area'.
- The mean forest patch size decreased exponentially on the 'farm area' and the 'ranch area'. The landscape pattern is increasingly more fragmented.
- The Matheron index increased rapidly between 1973 and 1993, and more rapidly on the 'farm area' than on the 'ranch area'. Fragmentation is increasing and it is higher on the 'farm area'.

6. Conclusion

The quantitative analysis of landscape patterns by spatial indices has enabled internal stratification, cross-site comparison and monitoring of landscape dynamics. The in-site variability study has shown the possibility of characterising different landscape patterns within an image and thus identifying spatially homogeneous in-site areas: along the Frederico Basadre road in Pucallpa, along rivers in Yurimaguas, around the Yurimaguas town or along the trans-Amazonian road in Theobroma. The corresponding indices give information on some factors behind deforestation, as access to land and to markets. Adding these landscape pattern indices as new channels to satellite images could improve land use/cover classification.

The cross-site comparison of spatial indices has been helpful in identifying and evaluating spatial differences between sites. It distinguishes quantitatively the main landscape characteristics which differ from the other sites, and it emphasises visual interpretation of landscapes.

The monitoring of landscape dynamic on Theobroma district with landscape pattern indices has helped to identify trends and quantify landscape changes: percentage forest decreases with forest cover, while Matheron index increases with fragmentation of landscape and fractal index with the complexity of the landscape pattern.

Thus landscape pattern indices are bringing about a universal language to describe landscapes, even if they still remain difficult to interpret in terms of biophysical or socio-economic factors and processes. Their interpretation requires an acute awareness of the landscape context and the openness of the landscape relative to the phenomenon under consideration. In that sense, landscape pattern indices are only support to analysis.

References

- BERRY, J. K., BUCKLEY, D. J., and MCGARIGAL, K., 1998, FRAGSTATS*ARC: Integrating ARC/INFO with the FRAGSTATS Landscape Analysis Program. ESRI 1998 User Conference, 27–31 July, 1998, San Diego, CA.
- BRANTHOMME, A., 1997, Caractérisation quantitative des paysages forestiers tropicaux. Application à l'analyse du déboisement par l'agriculture sur abattis-brûlis. Mémoire de stage. Montpellier, CIRAD.
- FORMAN, R. T. T., 1995, Land mosaics. *The Ecology of Landscape and Regions* (Cambridge: Cambridge University Press).
- FORMAN, R. T. T., and GODRON, M., 1986, *Landscape Ecology* (New York: John Wiley and Sons).
- IMBERNON, J., 1996, Visions of landscapes and vegetation changes. ASB project working paper, Nairobi: ICRAF.
- IMBERNON, J., 1999, A comparison of the driving Forces behind deforestation in the Peruvian and the Brazilian Amazon. *Ambio*, **28**, 509–513.
- IMBERNON, J., 1999, Changes in agricultural practice and landscape over a 60-year period in North Lampung, Sumatra. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, **76**, 61–66.
- MCGARIGAL, K., and MARKS, B., 1994, *FRAGSTATS. Spatial Pattern Analysis Program For Quantifying Landscape Structure*. (Oregon: Forest Science Department. Oregon State University).
- MORAN, E. F., 1993, Deforestation and land use in the Brazilian Amazon. *Human Ecology*, **21**, 1–21.
- SEYLER, F., BERNOUX, M., and CERRI, C. C., 1998, Landsat TM image texture and moisture variations of the soil surface under the rainforest of the Rondônia state, Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, 1299–1317.
- SKOLE, D., and TUCKER, C., 1993, Tropical deforestation and habitat fragmentation in the Amazon: satellite data from 1978 to 1988. *Science*, **260**, 1905–1909.
- TREES (Tropical Ecosystem Environment Observation by Satellite), 1995, *Study of forest non-forest interface typology of fragmentation of tropical forest* (Luxembourg: European Communities).
- TURNER, M. G., and GARDNER, R. H., 1990, Quantitative method in landscape Ecology: an introduction. *Ecological Studies*, **82**, 3–14.
- WOOD, C. H., SKOLE, D., PERZ, S., and CAETANO, A., 1996, Population and dforestation in the Brazilian Amazon. *Paper presented at the annual meeting of the Population Association of America*, 9–11 May, New Orleans.
- WULDER, M., and BOOTS, B., 1998, local spatial autocorrelation characteristics of remotely sensed imagery assessed with the Getis statistics. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, 2223–2231.
- ZHU, C., and YANG, X., 1998, Study of remote sensing image texture analysis and classification using wavelet. *International Journal of Remote Sensing*, **19**, 3197–3203.

2.3 Cartographie participative et évaluation d'impact au niveau local

Cette partie de mes travaux est dans la suite logique des travaux précédents et elle valorise les technologies les plus récentes, comme les capteurs satellitaires à très haute résolution spatiale. J'ai cité précédemment mes expériences de terrain qui ouvrait un champ d'investigation nouveau sur les sociétés qui occupaient les espaces que je cartographiais.

Dès 1984, lors d'une expérience personnelle très formatrice de « développement rural » au Burkina Faso où je travaillais directement pour les populations africaines rurales d'un territoire d'environ 200 km² où j'avais en charge le développement de périmètres irrigués, la construction de pistes et de forages, les aménagements antiérosifs sur les bassins versants... Dans cette expérience et quelques autres plus courtes par la suite, j'avais pu me rendre compte que les photographies aériennes dont je disposais pour les projets de développement étaient facilement « lues » par les acteurs locaux, y compris des agriculteurs qui ne savaient pas lire. Cette capacité à se repérer sur ces photos, à identifier les composantes du territoire m'avait impressionné. Mais nous n'étions pas alors entré dans les processus de décentralisation et la mobilisation de démarches « participatives » avec des populations locales n'était pas encore dans l'air du temps. De plus les images Spot que je traitais pour les projets de recherche étaient à l'époque peu adaptées à une lecture par les populations locales car leur résolution spatiale était trop faible (pixel de 20 m). Sur de telles images satellitaires il était difficile d'identifier des repères facilement identifiables et beaucoup d'objets se confondaient : limites de parcelles floues, bâti non individualisé, réseaux routiers ou hydrographiques non identifiables.

L'apparition de la très haute résolution spatiale des satellites Ikonos fin 1999 a largement modifié la donne et les images satellitaires se sont alors rapprochées des photographies aériennes. La cartographie participative, mobilisant les savoirs locaux, devenait alors possible et un nouveau champ d'investigation s'ouvrait.

2.3.1 Cartographie participative et à très haute résolution satellitale

Imbernon J., 2002. Cartographie participative à très haute résolution. Utilisation d'une image Ikonos dans un projet de développement communal en Haïti. *Revue Internationale de Géomatique*, Vol. 12 n° 1, p. 115-128.

Cartographie participative à très haute résolution

Utilisation d'une image Ikonos dans un projet de développement communal en Haïti

Jacques Imbernon

CIRAD

TA 60/15

73 rue Jean-François Breton

F-34398 Montpellier

e-mail imbernon@cirad.fr

RÉSUMÉ. Une expérience de cartographie participative à très haute résolution a été menée dans un projet de développement communal situé dans les régions montagneuses de Haïti. L'approche participative est utilisée pour analyser une image du satellite Ikonos à très haute résolution (THR). Cette expérience est réalisée dans les différentes sections communales après une rapide opération de formation et de sensibilisation. En trois jours les 15000 ha de la commune sont photo-interprétés par les villageois à l'échelle 1/10 000 sur deux thèmes : l'occupation des sols et la fertilité des sols. Ces thèmes sont légendés en dénomination vernaculaire. La photo-interprétation peut être digitalisée le jour même pour produire des statistiques et visualiser le produit cartographique. Cette expérience montre que l'imagerie à très haute résolution apporte une information détaillée sur la diversité du territoire et qu'elle est facilement lisible par les villageois. L'approche utilisée, avec successivement sensibilisation, formation, participation, et restitution s'avère efficace et facile à mettre en œuvre avec l'appui d'un spécialiste en approche participative. Le contenu thématique des cartes que nous obtenons synthétise les connaissances des habitants de leur territoire, et il est de fait très riche d'informations. Si la précision des tracés n'est pas excellente, les limites des unités cartographiques peuvent aisément être corrigées a posteriori. Enfin, nous proposons des améliorations pour réaliser la cartographie participative de façon digitale et interactive. A la suite de cette cartographie, d'autres opportunités apparaissent pour valoriser l'image satellitale THR, en particulier dans la planification. Une planification participative à très haute résolution déboucherait en effet sur une identification et une localisation précises des actions à entreprendre sur le terrain, et sur la mise en place d'un système de suivi-évaluation de ces actions sur l'ensemble du territoire de la commune.

ABSTRACT. A very high resolution mapping is carried out within a local development project in the mountains of Haiti. A participatory approach is applied in the different rural district sections, following a rapid training and sensitisation. Within 3 days, the 15 000 hectares area of the district is photo-interpreted at 1/10 000 scale by villagers over two themes : land cover and soil fertility, using vernacular names for the legend. The photo-interpreted maps are digitised the same day in order to produce statistics and printed maps. This work highlights

Revue internationale de géomatique. Volume 12 – n° 1/2002, pages 115 à 128

the detailed level of information offered by the very high resolution imagery over an heterogeneous territory. Through sensitisation, training and participation successively, this approach appears efficient and very easy to use. The thematic content of the resulting maps synthesise local knowledge of the inhabitants about their territory, and is full of information. Even if the limits drawn by participants are not always accurate, they can be easily corrected after all. And we suggest improvements for make participatory maps more digital and interactive. Further to this work, other uses of this satellite image are considered, mainly for planning. A very high resolution participatory planning could well identify and locate actions on field, and contribute to a monitor and evaluate these actions on the whole district.

MOTS-CLÉS : *Télédétection, très haute résolution, Ikonos, cartographie, Haïti, approche participative, développement local, occupation des sols, système d'information géographique.*

KEYWORDS : *remote sensing, very high resolution, Ikonos, mapping, Haïti, participatory approach, local development, land cover, geographic information system.*

1. Contexte général de l'étude

L'expérience de cartographie participative à très haute résolution que nous présentons est issue de la conjonction d'une offre technologique nouvelle : l'imagerie satellitale à très haute résolution (THR), et d'une méthode déjà largement utilisée qui favorise l'implication de la population dans l'analyse des données, l'identification des problèmes prioritaires et des actions à entreprendre : l'approche participative.

Dans le projet de développement de la commune de Marmelade, située dans les régions montagneuses de Haïti et mené par la FAO, l'approche participative a permis de réaliser un diagnostic intéressant. A nos yeux, elle a cependant au moins un inconvénient : celui de ne pas prendre en considération la métrique (aires, réseaux) ainsi que la variabilité des ressources et des utilisations de l'espace étudié. L'espace n'y est traité que de manière simplifiée, parfois caricaturale, comme le montre l'exemple de carte mentale (figure 1), réalisée lors du diagnostic participatif de Marmelade.

Ces cartes mentales ne peuvent donc pas servir de support à la planification et à l'aménagement du territoire. Elles ne sont que des représentations de l'espace tel qu'il est perçu par les habitants de la commune, sans notion de localisation, d'organisation et de structure de l'espace. A notre avis, leur objectivité peut même être mise en doute du fait des rapports de force entre les participants dans la formalisation de cette représentation, et de l'absence de neutralité dans le processus.

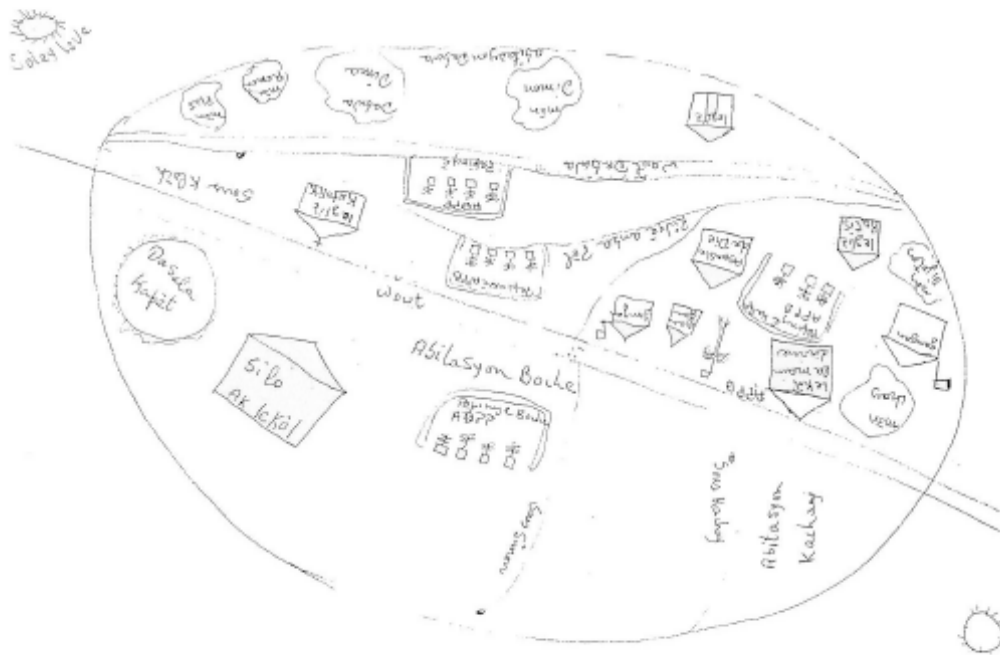


Figure 1. Carte mentale réalisée lors du diagnostic participatif (FAO Haïti)

Les cartes topographiques servent parfois de support dans des approches participatives. Au 1/200 000, parfois au 1/50 000 comme en Haïti, ces cartes sont le plus souvent anciennes et leur échelle n'est pas adaptée pour des études locales, sur des territoires communaux qui ne couvrent que quelques dizaines de km². De plus ces cartes sont déjà interprétées et elles peuvent biaiser l'analyse qui en est faite.

L'imagerie satellitale ou aéroportée fournit un support neutre, permettant d'initier l'approche participative. Force est de reconnaître toutefois que l'imagerie satellitale n'a pu être utilisée de façon probante jusqu'à présent dans cette approche, car les capteurs disponibles sur les satellites Spot, Irs ou Landsat n'offrent pas une résolution spatiale suffisamment fine. Les éléments du paysage, comme les pistes, le bâti, les limites de parcelles agricoles, les arbres, les ravines ou les aménagements antiérosifs sont difficilement perceptibles car ils sont le plus souvent d'une taille inférieure à la résolution du capteur. Ils se confondent donc dans des « classes radiométriques » qui ne sont pas ou peu compréhensibles par les populations locales.

La photographie aérienne a longtemps et souvent fourni un bon support d'information dans les processus de planification et d'aménagement du territoire. Elle peut offrir une résolution spatiale suffisante pour mettre en œuvre l'approche participative, dans une gamme d'échelle du 1/25 000 au 1/10 000. Toutefois les coûts de prise de vue et surtout la lourdeur des traitements géométriques (rectification de l'effet de la focale et de la ligne de vol, projection cartographique et

mosaïquage des photos) rendent difficile et cher l'emploi de ces photos aériennes dans les projets de développement local.

Dans ce contexte, les nouvelles images satellitales THR, disponibles depuis peu (2000), offrent de nouvelles perspectives. L'expérience positive, acquise auprès d'agriculteurs de diverses régions du monde, de lecture de photos aériennes incitait à prendre le pari que les populations locales pourraient reconnaître et analyser les éléments du paysage sur une image satellitale à très haute résolution. Le pari est réussi : l'imagerie satellitale THR a offert des informations détaillées, lisibles et analysables par les populations locales, et elle a permis de réaliser en peu de temps une cartographie participative à très haute résolution sur l'ensemble de la commune de Marmelade, soit sur une superficie d'environ 150 km².

2. Méthodologie

2.1. *Prétraitements de l'image*

Le satellite Ikonos2 est opérationnel depuis début 2000. C'est le premier d'une nouvelle génération de satellites commerciaux à très haute résolution, d'autres ont été lancés depuis (Eros) ou vont suivre prochainement (Spot5). Ikonos est un satellite défilant à orbite polaire dont l'heure de passage à l'équateur se situe autour de 10 h 30. Il comporte un capteur panchromatique (du visible au proche infrarouge : 0.45 à 0.90 μm) et un capteur multispectral dans les bandes bleu (0.45–0.53 μm), vert (0.52 – 0.61 μm), rouge (0.64 – 0.72 μm) et proche infrarouge (0.77–0.88 μm). La période de l'orbite est de 98 minutes (14 fois par jour) et la fréquence de prise de vue varie en fonction de la latitude entre 1 et 3 jours. La trace au sol sous l'orbite a 11 km de large.

L'image utilisée a été acquise le 21 janvier 2001. C'est une image panchromatique, livrée en deux scènes, à la résolution de 1 mètre, avec une projection UTM N18 (datum WGS 84). Les données sont codées sur 11 bits. Les caractéristiques de chacune des deux scènes sont i) un angle solaire azimutal de 145.86 degrés et zénithal de 43.43 degrés, 12 156 colonnes et 15 216 lignes, et ii) un angle solaire azimutal de 145.90 degrés et zénithal de 43.45 degrés, 5 788 colonnes et 15 280 lignes.

Des prétraitements ont été réalisés sur place en Haïti, à l'Unité de télédétection et de système d'information géographique (UTSIG) de Port au Prince :

- passage de 11 bits à 8 bits par rééchantillonnage, en optimisant le gain et l'offset pour minimiser les pertes. Ceci facilite les traitements ultérieurs avec le logiciel GeoImage, et réduit de moitié la taille des fichiers ;



Figure 2. *Extrait de l'image Ikonos au 1/5 500*



Figure 3. *Extrait de l'image Ikonos au 1/5 000*

- mosaïquage par simple translation en X et Y de l'image 62355 sur l'image 62354. Un véritable mosaïquage aurait nécessité l'orthorectification préalable de chacune des scènes avec le MNT ; mais nous ne disposions pas encore du MNT et l'orthorectification devait être réalisée ultérieurement par UTSIG. La translation a été opérée de manière à assurer la continuité du tracé routier ;

- réglage de la luminosité et du contraste de cette image et tests d'impression sur de petites imagettes pour optimiser la qualité de l'impression ;

- habillage de l'image avec les contours de la commune et des sections communales ;

- choix d'une échelle d'impression. Nous avons réalisé plusieurs tests d'impression, depuis l'échelle du 1/20 000 jusqu'au 1/2 500 (figure 2 et 3). L'échelle du 1/5 000 est apparue adaptée aux besoins de photo-interprétation sur le terrain, mais à cette échelle, l'image de 15 km x 15 km aurait eu une dimension de 3 m par 3 m. Une telle taille est non seulement difficile à manipuler sur le terrain, mais elle représente aussi un coût d'impression non négligeable. Nous avons donc choisi l'échelle du 1/10 000, soit une taille d'impression de 1.5 m x 1.5 m.

2.2. Formation – Information

Pour réaliser la photo-interprétation de cette image Ikonos, un film plastique est superposé à l'image et des feutres effaçables permettent de tracer et modifier les contours. Des feutres permanents sont ensuite utilisés pour sauvegarder en fin de séance ces tracés sur les films plastiques.

Une semaine avant le début de la cartographie participative, l'image a été affichée devant la mairie de la commune pour informer et sensibiliser la population. Cette image a suscité une grande curiosité. Ensuite, par l'intermédiaire des animateurs, nous avons informé les représentants des sections communales des dates et attendus des séances de photo-interprétation. Celles-ci ont été programmées dans chaque section communale, dans les écoles de ces sections.

Nous avons réalisé au préalable une journée de formation des 6 animateurs du projet (2 par section) afin de les familiariser avec l'image Ikonos, de leur expliquer les attendus de la cartographie et de préciser avec eux la méthode de cartographie participative à mettre en œuvre dans les sections communales (figure 4). Rapidement il est apparu que les animateurs lisaient sans difficulté l'image et identifiaient les différents éléments de leur territoire.

2.3. Nomenclature

La nomenclature de l'occupation des sols que nous avons élaborée sur la base de celle de l'USGS a été modifiée. Nous nous sommes en effet rendus compte que les animateurs (et *a fortiori* les agriculteurs) avaient des difficultés à caractériser les

unités suivant cette nomenclature. Ceci était lié à la difficulté à traduire cette nomenclature dans la langue créole et à l'inadéquation de cette nomenclature aux caractéristiques du paysage de cette zone montagneuse d'Haïti. Or les habitants de cette région avaient leurs propres dénominations vernaculaires pour caractériser l'occupation des sols. Nous avons donc décidé de retenir la nomenclature en langue créole suivante :

Terres de cultures vivrières : pois, patate douce, igname, maïs	Tè viv
Savanes herbeuses	Savann
Savanes arbustives, généralement sur fortes pentes avec affleurements rocheux	Makay
Forêts, bosquets, parfois avec igname	Rak
Plantations caféières, avec ou sans bananier. La densité de caféiers est très variable. Les caféiers peuvent avoir disparu	Jaden bati

Pour les contraintes et processus de dégradation, nous souhaitions caractériser la fertilité, la pente, l'érosion et le déboisement. Il est apparu que la pente, l'érosion et le déboisement étaient difficiles à classer par les agriculteurs. D'autre part, la pente serait une donnée accessible quantitativement avec le modèle numérique de terrain en cours de réalisation par UTSIG. Nous avons donc décidé de ne cartographier que la fertilité des sols, en utilisant la nomenclature vernaculaire suivante :

Sols nus, avec affleurements rocheux, incultes	Tè fini
Terres fertiles, dont le rendement varie de 5 à 15 marmites de haricots récoltés pour 1 marmite de semence	Tè gra
Terres peu fertiles, dont le rendement est inférieur à 5 marmites de haricots récoltés pour une marmite de semences	Tè pòv

Enfin nous avons décidé de ne pas cartographier les aménagements : plantations, digues et haies antiérosives, de peur de ne pas avoir assez de temps lors des séminaires et de nous disperser. Cette cartographie des aménagements sera réalisée lors des séminaires ultérieurs, destinés à planifier les actions de développement.

2.4. Cartographie participative au plus près des acteurs

Dans les sections communales, les séminaires de cartographie (figure 5) ont eu lieu avec les membres des Comités communaux de coordination et de programmation (CCCP), qui ont été constitués dans l'approche participative. Dans chaque section communale, le séminaire a duré une journée. Le déroulement du séminaire était le suivant :

- une introduction en créole par la responsable de l'approche participative afin d'expliquer l'objectif du séminaire et les attendus, présenter l'image et la nomenclature, et constituer deux groupes de 8 à 10 personnes, chacun ayant une image à sa disposition ;

- l'apprentissage à la lecture de l'image, chacun de groupes ayant au moins une heure pour se positionner sur l'image, identifier les principales structures du paysage (la piste, le bourg...), et identifier des objets familiers à chacun (l'habitation, le champ...). Chaque image était disposée à plat pour conserver les repères horizontaux et orientée géographiquement de telle sorte que les participants puissent aisément visualiser à l'extérieur de la salle les éléments proches du paysage qu'ils identifient sur l'image ;

- la photo-interprétation de l'image, un groupe traitant l'occupation des sols, l'autre la fertilité. Le tracé des unités était réalisé avec les feutres effaçables de couleur. L'interprétation a provoqué des discussions animées entre participants. Les animateurs ont joué à ce niveau un rôle précieux pour stimuler, encadrer et parfois modérer les discussions. Après une heure environ, les groupes étaient intervertis, chaque groupe passant sur la photo-interprétation de l'autre groupe. Nous avons demandé alors de faire une analyse critique du travail réalisé par l'autre groupe et quelques modifications, le plus souvent mineures, étaient alors apportées à la carte.

Lorsque les deux cartes étaient terminées sur l'ensemble de la section communale, les tracés étaient repris au feutre permanent. Puis l'évaluation collective du travail était animée par la responsable de l'approche participative afin de faire apparaître les difficultés rencontrées mais également les premières analyses de ces cartes.

Pour les 3 sections communales correspondant à une superficie totale d'environ 15 000 ha, ce travail de cartographie participative a été réalisé en 3 jours successifs.

2.5. Digitalisation et restitution en temps réel

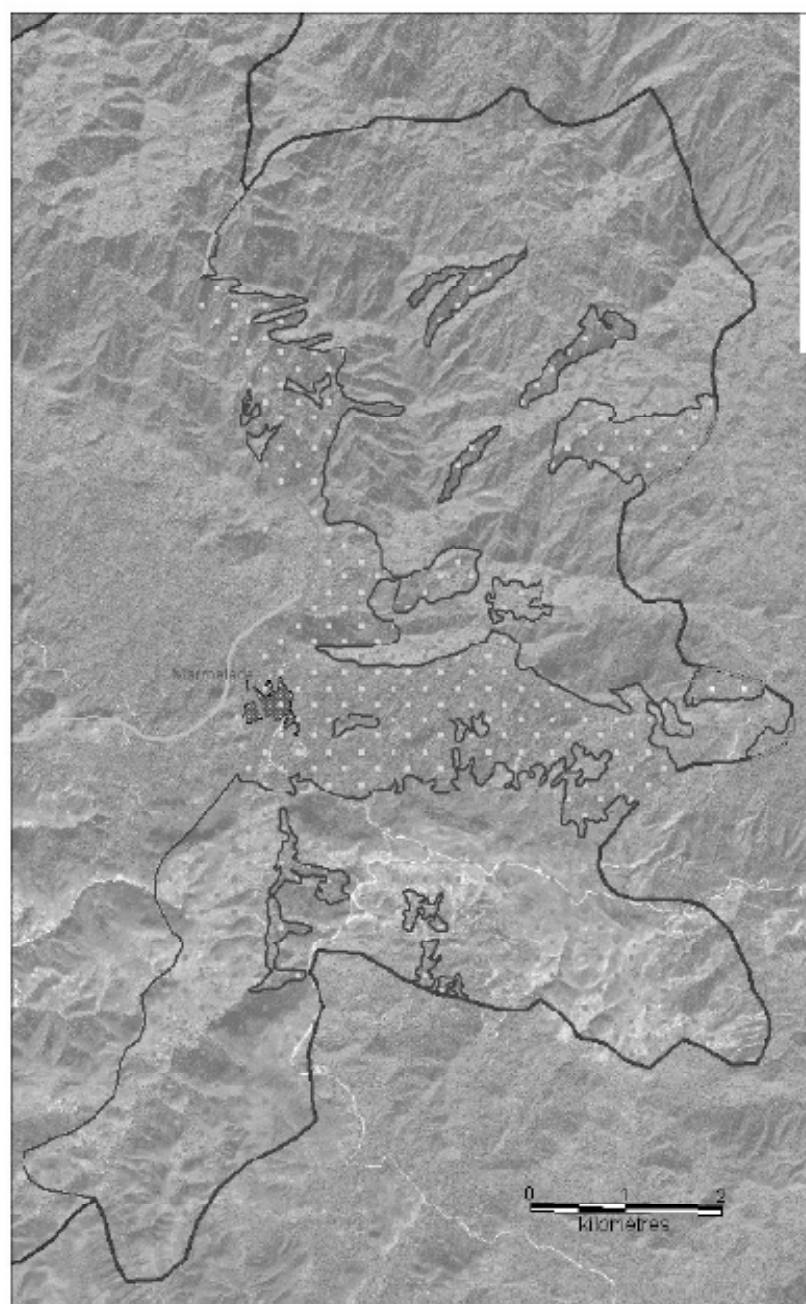
Les cartes réalisées sur film plastique ne pouvant être scannées en format A0 en raison du risque d'effacement du tracé par frottement, nous avons réalisé une digitalisation manuelle à l'écran d'un ordinateur avec le logiciel MapInfo, avec en fond l'image Ikonos et avec la photo-interprétation à côté de soi. Cette méthode n'est pas la plus directe mais elle est relativement rapide puisque nous avons pu digitaliser une carte le soir même d'un séminaire. De plus, la digitalisation à l'écran offre l'avantage de pouvoir corriger le tracé des limites d'unités réalisé par les participants, et d'en améliorer la qualité du point de vue géométrique tout en gardant le contenu thématique. La digitalisation sous MapInfo nous a permis enfin d'intégrer cette information dans le système d'information géographique qui avait été constitué.



Figure 4. *Atelier de formation des animateurs du projet*



Figure 5. *Séminaire de cartographie participative dans une section communale*



	Tè Viv	4018.01 Ha
	Tè Bati	1103.56 Ha

Echelle 1/50000

DOCUMENTÉ PAR LE PNUD 11/03/01
sur la base du relevé de la carte IGN 1/50000
dans le territoire de Narmala de la population

Figure 6. Carte d'occupation des sols sur la section communale de Crête à Pin
(photo-interprétée le 14/03/01 et imprimée le 15/03/01)

Le soir même du séminaire, la digitalisation de la photo-interprétation sur la section communale de Crête à Pin (figure 6) a permis d'obtenir la superficie des plantations caféières (Tè Bati) : 1103.5 ha. Cette simple évaluation de la superficie caféière avait dans ce cas une importance capitale pour un projet de développement de la « caféière » sur la commune financé par le gouvernement coréen. Cet important projet n'avait jusqu'à présent aucune idée précise des superficies cultivées en café et de leur répartition sur le territoire communal.

Enfin, le simple fait de présenter la carte et le chiffre des superficies le lendemain du séminaire a eu un fort impact sur la motivation des participants qui ont pu voir ainsi le résultat immédiat de leur travail.

3. Analyse et discussion

Cette méthode de cartographie participative à très haute résolution est nouvelle. Il est donc important d'en faire ici une analyse critique pour améliorer sa mise en œuvre et la reproduire sur d'autres projets de développement local.

3.1. Intérêt de l'image satellitale THR

Cette expérience en Haïti a montré que l'image Ikonos est un excellent support pour la cartographie participative. Son coût est relativement élevé, mais il faut signaler que le marché de l'imagerie à très haute résolution est en rapide évolution avec l'arrivée des satellites Eros, Earlybird, Spot5. Les coûts devraient donc baisser significativement dans les mois à venir. Mais à produit équivalent en géométrie (résolution, rectification et projection), l'image Ikonos au coût actuel reste moins coûteuse que la photo aérienne. Nous proposons ci-dessous un tableau comparatif de coût :

Produits	Coût au km ²
Ikonos panchromatique à 1m	35 USD
Ikonos multispectral à 1 m	39 USD
Eros panchromatique à 1.8m	9.6 USD
Photos couleurs aériennes 1/5 000 *	250 à 1 000 USD

*(coût approximatif, y compris la rectification géométrique et le mosaïquage)

Pour des raisons d'économie (au moment de l'étude, l'image en mode multispectral 1 m coûtait encore 49 USD le km²), nous avons acquis une image panchromatique pour le projet de Marmelade. L'expérience acquise depuis sur d'autres sites et la baisse de prix incite toutefois à recommander une image multispectrale (4 canaux) à 1 mètre de résolution, car la discrimination des objets (cultures, arbres, bâtis, bas-fonds...) y est très supérieure, et la lisibilité en est facilitée.

3.2. Qualité du support de la photo-interprétation

L'impression « papier » de l'image a été réalisée au 1/10 000. L'échelle du 1/5 000 est bien plus lisible pour ce genre de cartographie. Il aurait été préférable de réaliser les impressions sur des cartons de 1 m x 1 m au 1/5 000 (3 x 3 cartons).

Une autre méthode aurait été de réaliser la photo-interprétation de l'image directement sur un grand écran de télévision, connecté à un ordinateur portable. Outre l'interactivité du processus de cartographie participative, ceci offrirait l'avantage de passer aisément d'une échelle à une autre par des zooms, d'obtenir directement une carte digitalisée qui permette à la fois des corrections aisées des tracés de la carte et des analyses rapides comme la planimétrie de thèmes. Pour une raison matérielle, notre tentative n'a pas abouti en Haïti lors de notre intervention, mais techniquement il n'y a aucune difficulté. Dans le même sens, un video-projecteur pourrait être utilisé, bien que souvent il soit difficile d'occulter les sources de lumière naturelle et que la lisibilité en est réduite.

3.3. Cartographie participative

Du point de vue de la communication, formation, préparation, peu de choses sont à améliorer par rapport à cette expérience en Haïti. Nous rappelons le besoin i) d'informer les populations (affichage avant le séminaire), ii) de former les animateurs, iii) de choisir une dénomination vernaculaire adaptée pour la cartographie participative, iv) de présenter l'image à plat et bien orientée.

La cartographie participative a mis en évidence un certain nombre de besoins : i) mobiliser un spécialiste en communication et approche participative pour animer les séminaires, ii) laisser le temps aux groupes de participants de « lire » l'image pour s'y habituer et y trouver des repères, iii) croiser les groupes de photo-interprétation pour confronter les perceptions, iv) assister les groupes lors du tracé des limites d'unité en mobilisant un cartographe.

Enfin la restitution cartographique faite le lendemain des ateliers a eu un fort impact auprès des participants, même si la carte est à ce stade relativement imparfaite. Ceci a motivé tous les participants et a valorisé leur participation.

3.4. Contenu thématique et qualité géométrique

Nous sommes persuadés que le contenu thématique des cartes réalisées par cette méthode de cartographie participative à très haute résolution est plus riche et précis que celui qu'aurait pu produire un cartographe avec plusieurs semaines de terrain. La connaissance du territoire qu'ont les populations qui résident sur la commune et en utilisent les ressources est en effet bien plus importante que celle que peut acquérir un expert « de passage ». Le fait de réaliser la cartographie collectivement

permet de confronter les savoirs individuels des participants et de minimiser par la recherche de consensus les erreurs de perception et d'interprétation.

Le tracé des limites des unités cartographiques reste parfois approximatif. Nous n'avons pas affaire à des cartographes, mais à des agriculteurs qui pour la plupart voient pour la première fois une image et une carte. L'échelle de l'impression 1/10 000 s'est avérée parfois insuffisante pour identifier sans confusions des limites d'unités. Mais le fait qu'un cartographe contrôle les tracés, d'une part sur les films transparents lors de la photo-interprétation puis d'autre part lors de la digitalisation sur l'écran d'ordinateur, permet de corriger les erreurs de tracé et de s'assurer de la qualité géométrique des cartes réalisées.

4. Conclusion

L'approche participative dans les projets de développement local est largement utilisée par des institutions comme la FAO ou la GTZ, mais aussi par les services nationaux des ministères de l'Agriculture ou de la Planification. Dans notre étude, l'innovation réside dans l'utilisation de l'imagerie satellitale à très haute résolution qui apporte un progrès considérable dans la caractérisation de la diversité des espaces. Elle offre des échelles fines de l'ordre du 1/5 000 qui permettent d'individualiser les éléments du paysage (arbre, habitation, limite de parcelle...). Elle est également un support parfaitement neutre, représentant une réalité territoriale, sur lequel peuvent ensuite se confronter les différentes perceptions des acteurs locaux. L'imagerie satellitale THR reste en effet basée sur une réalité physique, la radiométrie des éléments de paysage, et ces radiométries peuvent être combinées pour obtenir des couleurs naturelles par une composition des canaux RVB.

L'expérience de cartographie participative que nous avons menée dans le projet de développement de la commune de Marmelade, sur 15 000 ha, montre la grande facilité avec laquelle les villageois peuvent lire cette image, s'approprier cette information et en faire une analyse pour produire une carte d'occupation des sols et une carte des contraintes en fertilité.

Enfin, le fait que l'image soit géoréférencée permet d'avoir rapidement des informations quantitatives, comme par exemple les superficies de la culture du caféier ou la longueur totale des digues antiérosives sur les versants. Elle permet aussi de localiser précisément des actions comme l'aménagement de bornes-fontaines, et d'en mesurer l'aire d'influence sur le territoire communal.

D'ores et déjà, l'extension à d'autres régions d'Haïti et d'autres projets est envisagée par la FAO et le PNUD. Si ces perspectives sont intéressantes, il nous paraît toutefois souhaitable de prolonger cette expérience de cartographie participative à très haute résolution par un exercice équivalent de planification territoriale. Dans ce sens, les données biophysiques et socio-économiques du SIG que nous avons constitué pour le projet seraient complémentaires de l'information

extraite de l'image Ikonos. Cette planification participative à très haute résolution déboucherait sur l'identification et la localisation précise des actions de développement à entreprendre sur le terrain, et sur la mise en place d'un système de suivi-évaluation spatialisé. L'imagerie satellitale THR offre donc de nombreuses opportunités pour appuyer les projets de développement local.

5. Bibliographie

- CLOUET Y., « Le zonage à dire d'acteurs. Méthode et perspective » *Bois et forêts des tropiques*, vol. 65, 2000, p. 45-59.
- GUERINGER A., PERRET J., BAUD G., *Diagnostic à l'échelle de petites régions rurales : démarches, méthodes et sources d'information*. CEMAGREF, Anthony, France, 1993.
- IMBERNON J., Base de données et système d'information géographique. Rapport de mission FAO en Haïti du 28/02 au 23/03/2001, CIRAD, Montpellier, 2001.
- LOINGER G., NÉMERY J.C., *Construire la dynamique des territoires... Acteurs, institutions, citoyenneté active*. Paris, L'harmattan, Ecole Polytechnique, 1994.

2.3.2 Apport d'une image à très haute résolution dans l'évaluation de l'impact environnemental de populations réfugiées

Imbernon J., 2003. Image Ikonos et étude environnementale : le camp de réfugiés du Hcr en Guinée forestière. *Bois et forêts des tropiques*, n° 275/1 : 17-28.

BOIS ET FORÊTS DES TROPIQUES, 2003, N° 275 (1) **DOSSIER** 17
ÉTUDE ENVIRONNEMENTALE / TÉLÉDETECTION

Image Ikonos et étude environnementale : le camp de réfugiés du Hcr en Guinée forestière

Cette étude est un essai pour **améliorer la gestion des situations d'accueil** de réfugiés en Afrique de l'Ouest. Elle a été réalisée à la demande du Fonds français pour l'environnement mondial (Ffem) pour le compte du Haut-Commissariat des Nations unies pour les réfugiés (Hcr). Ce volet met en œuvre les dernières avancées de l'imagerie satellitaire. Il est couplé notamment avec un volet socio-économique et environnemental (encadré 1).

Jacques IMBERNON
Cirad-tera, TA 60/F
Programme espaces et ressources
34398 Montpellier Cedex 5
France

Femme guinéenne avec sa fille.
Guinean woman with her daughter.
Photo Cirad-forêt.

RÉSUMÉ

IMAGE IKONOS ET ÉTUDE
ENVIRONNEMENTALE : LE CAMP
DE RÉFUGIÉS DU HCR EN GUINÉE
FORESTIÈRE

L'impact environnemental du camp de populations réfugiées de Katkama, en Guinée forestière, est mesuré par télédétection spatiale en utilisant une image du satellite Ikonos à très haute résolution. Sur une zone de 100 km² autour du camp, cette image permet de cartographier finement l'habitat, les forêts secondaires, les agroforêts et la palmeraie traditionnelle, ainsi que l'accès au réseau routier et aux bas-fonds cultivables. La photo-interprétation met en évidence une forte emprise spatiale des camps de réfugiés, un grand nombre de bas-fonds cultivables, et une faible couverture forestière. Plus encore, les palmiers à huile sont identifiés individuellement. De l'analyse spatiale de ces informations, il ressort la faible densité de forêts et de palmiers à huile, et le fort potentiel pour l'agriculture de bas-fond. La position du camp de Katkama permet de minimiser les risques de dégradation environnementale et facilite l'accès à l'eau et aux bas-fonds cultivables. Enfin, une analyse de l'ensemble de l'image montre que le couvert arboré est fragmenté en îlots, que les agroforêts forment le plus souvent des auroles autour des villages et que la densité de palmiers à huile varie entre les terres cultivées, les agroforêts et les forêts secondaires. Dans cette étude environnementale, l'imagerie à très haute résolution est une technologie utile et adaptée, alliant un fort pouvoir de discrimination des objets et une grande facilité d'intégration dans un système d'information géographique.

Mots-clés : télédétection, image Ikonos, occupation des sols, réfugié, Guinée.

ABSTRACT

IKONOS IMAGERY AND
ENVIRONMENTAL STUDIES: AN HCR
REFUGEE CAMP IN THE GUINEAN
FOREST

The environmental impact of the refugee camp in the Guinean forest region of Katkama was measured by remote sensing using very high resolution Ikonos satellite imagery. The image has enabled detailed maps to be made of a 100 km² area around the camp, including habitat, secondary forest, agro-forestry zones and traditional palm groves, as well as access to roads and to moist hollows where cultivation is possible. Photo-interpretation has shown the considerable extent of encroachment of the refugee camp, a large number of moist hollows and low forest cover (12 % of the total area). Each oil palm can be identified individually. Spatial analyses of the data on the camp's immediate surroundings show the low density of forest and oil palms and the high potential for cultivation in moist hollows. The position of the Katkama camp thus minimises risks of environmental degradation and facilitates access to water and moist hollows. Finally, an analysis of the image of the whole shows that tree cover is fragmented into patches, that cultivated trees generally form rings around the villages and that the density of oil palms varies between cultivated areas, agroforest and secondary forest. Very high resolution imagery has proved to be both useful and well-suited to such environmental studies, thanks to excellent capacity for discrimination between objects and for integration within geographic information systems.

Keywords : remote sensing, Ikonos imagery, land use, refugee, Guinea.

RESUMEN

IMAGEN IKONOS Y ESTUDIO
MEDIOAMBIENTAL: CAMPO DE
REFUGIADOS DEL ACNUR EN
GUINEA FORESTAL

Se empleó la teledetección espacial para medir el impacto medioambiental del campo de refugiados de Katkama, en Guinea Forestal, utilizando una imagen de muy alta resolución del satélite Ikonos. Dentro de una zona de 100 km² en torno al campo, esta imagen permite cartografiar detalladamente el hábitat, los bosques secundarios, los agrobosques y el palmeral tradicional, así como el acceso a la red de carreteras y a las tierras bajas cultivables. La fotointerpretación pone de manifiesto una fuerte influencia espacial de los campos de refugiados, un gran número de tierras bajas cultivables, y una escasa cobertura forestal; y todavía más, se pueden identificar individualmente las palmeras de aceite. El análisis espacial de estas informaciones a proximidad de los campos, muestra la baja densidad de bosques y palmeras de aceite, y el alto potencial para la agricultura de los terrenos bajos. La posición del campo de Katkama permite pues minimizar los riesgos de degradación medioambiental y facilita el acceso al agua y a las tierras bajas cultivables. Por último, un análisis del conjunto de la imagen muestra que la cubierta arbórea está fragmentada en forma de islotes, que los agrobosques forman a menudo aureolas en torno a los pueblos y que la densidad de palmeras de aceite varía entre las tierras cultivadas, agrobosques y bosques secundarios. En este estudio medioambiental, las imágenes de muy alta resolución constituyen una tecnología útil y adaptada que reúne un fuerte poder de distinción de objetos y una gran facilidad de integración en un sistema de información geográfico.

Palabras clave: teledetección, imagen Ikonos, ocupación de suelos, refugiado, Guinea.

Contexte général de l'étude

L'intérêt de l'imagerie satellitaire n'est plus à démontrer dans les domaines de l'agriculture, de la forêt, de la gestion des ressources naturelles ou de la surveillance des risques naturels. Des capteurs à haute résolution (HR), comme Hrv du satellite Spot 4 ou Tm+ de Landsat 7, ont été et restent largement utilisés. Différentes méthodes de classification sont disponibles pour affecter chaque pixel à un certain thème, en se fondant sur les caractéristiques spectrales du pixel : classification supervisée à partir d'échantillons caractérisés au sol ou classification non supervisée définissant des classes spectrales qui sont ensuite agrégées par l'analyste de façon interactive.

La résolution spatiale de ces images HR est de 20 m pour Spot Hrv et de 30 m pour Landsat Tm+. Se pose, toutefois, le problème de la classification des pixels mixtes, composés de plusieurs objets, soit parce que leur taille est inférieure à la résolution du capteur, soit parce que le pixel est à cheval sur deux objets. Dans des paysages relativement fragmentés, comme par exemple de petites parcelles de culture distribuées en forêt, ou pour des études locales nécessitant une grande précision spatiale et thématique, la classification de ces données HR ne fournit pas d'informations suffisamment fiables ou pertinentes. De ce fait, beaucoup d'études d'impact ou de projets de développement local ne font pas appel à ces images HR.

Depuis peu, l'imagerie satellitaire à très haute résolution (Thr), dont la résolution est de 1 à 4 m, offre de nouvelles perspectives dans ces domaines d'application. Comparées à la photographie aérienne de même échelle, ces images sont numériques, géoréférencées et multispectrales. Elles sont à la fois riches en informations et directement utilisables dans

Encadré 1

LES ÉTUDES SOCIO-ÉCONOMIQUE ET ENVIRONNEMENTALE

Sur le terrain, des études sont aussi menées dans deux domaines complémentaires d'u volet présenté dans cet article.

- En socio-économie, on étudie l'insertion des réfugiés libériens et sierra-léonais dans l'économie régionale et les structures productives en milieu rural, ainsi que les différentes formes d'accès à la terre chez ces réfugiés en fonction des divers statuts fonciers. Le volet économique est l'occasion de resituer la question des pressions exercées sur les ressources naturelles par rapport à la réalité de la demande et des spéculations les plus importantes. L'enquête va permettre d'évaluer le poids des sollicitations induites par le débouché des marchés et de confronter le problème des dégradations environnementales aux tendances et enjeux d'une économie en pleine restructuration. Les premières enquêtes ont, d'ores et déjà, permis de se rendre compte de l'importante implication des réfugiés dans les circuits d'échange, et dans l'ensemble des activités économiques de la région en général. Certains produits sont actuellement en plein essor grâce aux réfugiés, tels les produits maraîchers. Et la capacité de ces derniers à être mobiles leur a également permis de se constituer en main-d'œuvre journalière dans la coupe du bois et le transport vers les centres urbains. Le second volet, consacré à l'étude de l'impact des réfugiés sur les structures et les pratiques foncières, permet d'analyser les modes d'accès à la terre, la participation des réfugiés à l'activité agricole, l'évolution des modes d'occupation des terres au sein des terroirs (dont les espaces cultivés), la pression foncière actuelle, et plus globalement l'ampleur des défrichements occasionnés ou non par la présence des réfugiés en milieu rural. Des villages et des camps ont été sélectionnés en tenant compte de la diversité régionale, d'un point de vue écologique, économique, ethnique et démographique, de la diversité de l'habitat (en milieu urbain, en milieu rural, en camp de réfugiés isolé) et de l'ancienneté des camps (camp nouveau, camp ancien).
- En foresterie et écologie forestière, on évalue la part respective des réfugiés et des populations locales, avec leurs pratiques traditionnelles, dans la disparition de la forêt dense, ainsi que la régénération forestière (d'un point de vue qualitatif et quantitatif) dans les zones dégradées puis abandonnées par les réfugiés rapatriés dans leur pays d'origine (cas des réfugiés libériens dans la région de Diécké).

Certains sites sont communs aux enquêtes socio-économiques et aux inventaires floristiques. Nous cherchons plus particulièrement, sur ces sites, à suivre les circuits économiques de la commercialisation du charbon de bois et à mesurer le rôle des réfugiés. Des images Ikonos y sont également programmées pour disposer (comme cela a été fait autour du camp de Katkama) d'une localisation des diverses activités et occupations des sols, ainsi que d'une évaluation planimétrique des impacts qui sont évalués par les travaux de terrain.

L'étude socio-économique est réalisée par Aboubacar Camara (Irag) et Adrien Polomack (université Paris VII). L'inventaire floristique est établi par Moussa Diabate (Irag) et Bernard Dreyfus (Ird).

Contexte environnemental et humanitaire

des systèmes d'information géographique (Sig) pour des diagnostics et une aide à la décision. Il s'agit donc d'une opportunité technique et méthodologique qui nous est offerte pour mieux appréhender les territoires et leurs ressources.

L'analyse que nous avons faite ici de ces données Thrs s'intègre dans un projet intitulé « Impact environnemental des populations réfugiées dans les zones d'accueil ». La zone d'accueil étudiée plus particulièrement se situe en Guinée forestière (figure 1).

La Guinée forestière est une région montagneuse, dont l'altitude moyenne varie entre 600 et 800 m, le relief étant le plus souvent formé de collines à fortes pentes, séparées par des bas-fonds et des plaines alluviales. Elle est le château d'eau de l'Afrique de l'Ouest, avec de nombreux et importants cours d'eau qui y prennent leur source (comme le Milo et le Niandan, qui alimentent le Niger au nord).

Cinq types de végétation sont majoritairement présents : les forêts denses, qui correspondent le plus

souvent aux forêts classées, protégées ou enclavées sur des reliefs peu accessibles ; les recrus forestiers plus ou moins anciens (que nous appelons par la suite forêts secondaires), dominés par le parasolier (*Musanga ce cropioides*) et le palmier à huile (*Elaeis guineensis*) ; les jachères dominées par des espèces spontanées, herbacées et arbustives ; les forêts secondaires dégradées, soumises aux feux de brousse et à la culture itinérante ; les savanes herbacées et arbustives, le plus souvent impropres à l'agriculture.

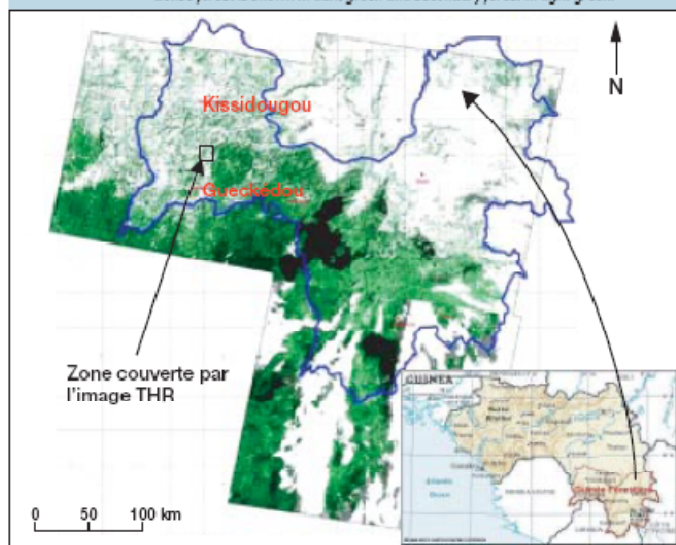
Le climat de la Guinée forestière est de type subéquatorial, avec une longue saison des pluies, de sept à huit mois (d'avril à novembre). La pluviosité annuelle varie entre 1 750 mm, à Beyla et Kissidougou, et 2 500 mm, à Gueckédou et Macenta.

La population est essentiellement rurale (78 %) et la densité moyenne de 43 habitants au kilomètre carré. L'agriculture repose sur le riz, aliment de base, cultivé majoritairement en pluvial sur les coteaux, mais également de plus en plus dans des bas-fonds irrigués. Le café, culture pérenne souvent en association avec le bananier, est cultivé dans les zones de forêts denses humides et de forêts secondaires. Enfin, le palmier à huile, présent dans les zones de culture pluviale et en périphérie des forêts, apporte traditionnellement un complément alimentaire et monétaire non négligeable.

D'après le recensement de 1996, la population de Guinée forestière est estimée à plus d'un million cinq cent mille personnes. Toutefois, compte tenu de la proximité avec la Sierra Leone et le Liberia, qui connaissent depuis une dizaine d'années conflits internes et guerres civiles, la Guinée forestière accueillait à la même époque environ 620 000 réfugiés, soit 40 % de la population totale. Pour plus de 75 %, ces réfugiés se sont installés en zone rurale, dans des camps jouxtant des villages guinéens ou au sein même de ces villages, disséminés tout au long de la frontière.

Figure 1.

Localisation de l'image Ikonos (de très haute résolution, Thrs) en Guinée forestière. La limite administrative de la Guinée forestière est représentée par un trait bleu ; la forêt dense est en vert foncé et la forêt secondaire en vert clair. Location of the Ikonos image (very high resolution or VHR) in the forest areas of Guinea. The administrative boundaries of the area are shown as blue lines; dense forest is shown in dark green and secondary forest in light green.



Si la situation alimentaire de ces populations est restée satisfaisante tout au long de cette période, c'est en partie grâce à l'aide alimentaire distribuée par le Hcr et les Ong. Mais c'est aussi du fait d'une exploitation accélérée des ressources naturelles par l'agriculture, la coupe de bois, ou les prélèvements sur la palmeraie (palmes et vin de palme). Dans certaines zones, ces pratiques des réfugiés ont entraîné d'importantes dégradations : déboisement, érosion des sols, dégradation de la palmeraie.

Télédétection spatiale

Sur les espaces où sont accueillis des réfugiés, les changements dans l'occupation des sols peuvent être très rapides du fait de la concentration subite des populations dans un espace réduit. En contrepartie, l'extension spatiale de ces changements peut rester relativement circonscrite à la proximité des camps. Pour caractériser la diversité des situations et suivre les changements dans l'occupation des sols, nous utilisons, dans ce projet, toutes les résolutions de la télédétection spatiale : depuis la basse résolution (1 km) pour l'échelle régionale jusqu'à la très haute résolution (1 m) pour des camps, en passant par la haute résolution (20 à 30 m).

L'imagerie satellitaire à très haute résolution (résolution de l'ordre de 1 à 4 m) est nouvelle. Nous montrerons l'utilisation d'une image Ikonos (encadré 2) à 1 m de résolution sur le camp de Katkama (au sud de Kissidougou). Ce camp a un intérêt particulier car il a été créé en urgence, au début de l'année 2001, pour accueillir les dizaines de milliers de réfugiés repoussés vers cette région par les incursions de la guérilla.

L'analyse de cette image Ikonos a pour but de caractériser l'environnement immédiat de ce nouveau camp, afin de mieux évaluer les ressources naturelles et les risques liés

Encadré 2

IMAGE IKONOS

L'image a été acquise par le capteur du satellite Ikonos-2 le 7 mars 2001. La couverture demandée, 12,5 km x 12,5 km, est assurée par deux images de 2,6 km x 12,5 km et 11 km x 12,5 km, ayant un recouvrement de 1,1 km. Ces images sont des produits « *pan-sharpening* », combinant le contenu spatial d'images panchromatiques (0,45-0,90 µm) à 1 m de résolution et le contenu radiométrique d'images multispectrales à 4 m de résolution. La résolution spatiale des images délivrées est donc de 1 m et la résolution spectrale de quatre canaux : bleu (0,45-0,53 µm), vert (0,52-0,61 µm), rouge (0,64-0,72 µm) et proche-infrarouge (0,77-0,88 µm). Ces deux images sont corrigées géométriquement et mises dans la projection *Universal Transverse Mercator*, hémisphère Nord, zone 29, datum WGS84. Les angles zénithal et azimutal solaire de ces images sont voisins de 60° et 117° respectivement. Le format des données délivrées par le fournisseur (Spacel Imaging) est un GeoTiff codé sur 11 bits par pixel. Cette image Ikonos est difficilement comparable à une image Spot ou Landsat de la même zone (figure 2). On identifie, en effet, sur l'image Ikonos les éléments individualisés du paysage : une habitation, un abri de réfugiés, un arbre, une piste, une parcelle de culture, un bas-fond (figure 3), alors que ces éléments sont « mélangés » sur l'image Spot (pixels mixtes).

Chaque élément identifié sur l'image Ikonos a lui-même une variabilité interne. Il est caractérisé non seulement par sa radiométrie (moyenne et variance) dans les différentes bandes spectrales, mais également par sa forme et, pour les objets élevés, par leur ombre. Aucun traitement « automatique » par des méthodes de classification spectrale ou des méthodes de morphologie mathématique n'est utilisé. Les erreurs seraient trop importantes pour les besoins de l'étude. Seule une photo-interprétation de l'image a été réalisée dans le but d'estimer l'apport de cette image pour caractériser finement l'environnement du camp.

Les images au format GeoTiff sont intégrées directement dans un système d'information géographique (Sig). En combinant les canaux R, V, B, l'image est affichée en vraies couleurs et elle est photo-interprétée à l'écran à l'aide du logiciel MapInfo pour produire rapidement et avec une bonne précision des couches d'informations vectorielles et géoréférencées. Cette utilisation directe de l'image à très haute résolution dans un Sig, sans recours à un logiciel d'analyse d'image, a été choisie pour rendre le traitement accessible à un plus grand nombre d'utilisateurs.

aux prélèvements par les réfugiés. L'objectif est aussi de mieux caractériser les composantes et les formes d'organisation des paysages de la zone, pour réduire au maximum les impacts environnementaux sur des espaces plus larges, mais qui risquent d'être perturbés par cette arrivée massive de réfugiés.

L'image Ikonos sera utilisée plus particulièrement pour cartographier et analyser la répartition de l'habitat et du couvert forestier (forêts secondaires, agroforêts et palmeraie traditionnelle), l'accès au réseau de communication et aux bas-fonds potentiellement cultivables.

Défriche par les réfugiés, dans le « bec de canard », au sud de Gueckedou. Juillet 2000.
Clearings made by refugees in the "duck's bill" to the south of Gueckedou. July 2000.
Photo J. Imbernon.



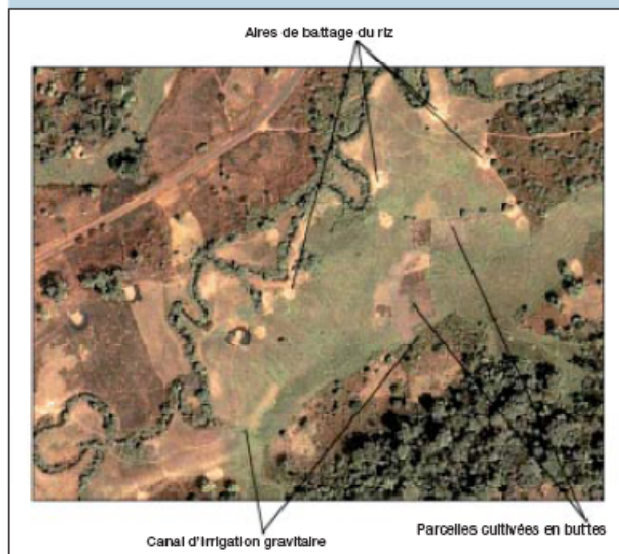


Figure 8.
Sur l'image Ikonos d'un bas-fond, identification des canaux d'irrigation gravitaire, des aires de battage du riz et des parcelles cultivées en buttes.
Ikonos imagery of a moist hollow showing identifiable gravity-fed irrigation canals, rice winnowing areas and mound cultivation.

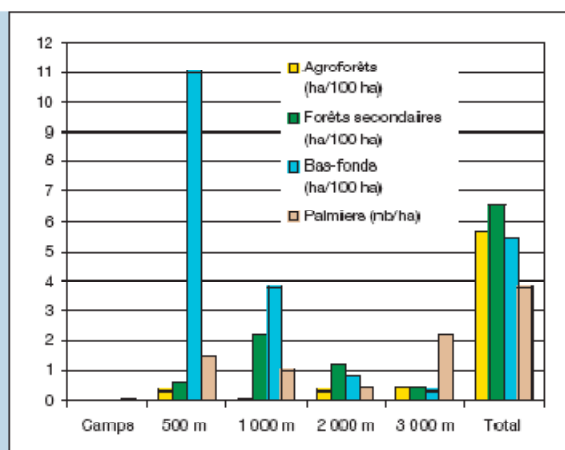


Figure 9.
Densité d'agroforêts, de forêts secondaires, de bas-fonds et de palmiers en fonction de la distance au camp de Katkama.
Density of agroforest, secondary forests, moist hollows and palms, according to their distance from Katkama camp.

Les îlots forestiers peuvent être reliés entre eux par des forêts-galeries, distribuées le long du réseau hydrographique. Ce réseau étant dense dans cette zone, les forêts-galeries sont nombreuses, ce qui permet, dans une certaine mesure, la préservation de la biodiversité.

Dans le cas présent, le palmier à huile (*E. guineensis*) est bien représenté, notamment dans les terres de culture, les têtes de bas-fond et les forêts secondaires. Nous distinguons quatre types de répartition pour cette espèce :

- dispersée sur les zones de cultures annuelles (faibles densités sur de grands espaces) ;
- concentrée (en taches) dans des agroforêts ou des forêts secondaires ;
- répartie en périphérie (pourtour) des agroforêts et des forêts secondaires ;
- concentrée en tête (en taches) ou en périphérie (pourtour) de bas-fonds.

Pour des raisons de droit d'accès, ce sont les palmiers hors des parcelles de cultures pluviales, c'est-à-dire à la périphérie des agroforêts et des forêts secondaires, ou le long des bas-fonds, qui seront les plus exposés aux prélèvements des réfugiés.



Bas-fond aménagé par le Hcr dans la région de Gueckedou, juillet 2000.
Moist hollow in the Gueckedou region, with HCR equipment, July 2000.
Photo J. Imbernon.

Perspectives

L'analyse d'une image à très haute résolution *Ikonos pan-sharpening* (1 m de résolution, quatre bandes spectrales) offre donc une nouvelle vision des paysages par rapport aux images Spot ou Landsat. Non seulement les limites géométriques des unités sont plus précises, mais leur contenu thématique devient beaucoup plus détaillé.

L'image Ikonos que nous avons utilisée améliore les possibilités d'analyse. Elle permet d'identifier de nombreux éléments du paysage que nous ne pouvions pas discerner sur les images Spot ou Landsat, comme les réseaux de pistes rurales, les agroforêts ou les palmiers. Elle permet de mieux caractériser les unités de paysage, comme les bas-fonds (types d'aménagement ou de mise en culture) ou les constructions (abris de réfugiés, cases villageoises, greniers à grain).

Pour le Hcr, qui cherche à minimiser l'impact environnemental des populations de réfugiés et à mieux planifier ses actions dans ce sens, l'imagerie à très haute résolution apparaît bien adaptée à ses préoccupations. D'une part, elle informe sur la

localisation des camps et des infrastructures. Jusqu'à maintenant, le Hcr réalisait ces levés au moyen de Gps. Le plus souvent, il ne dispose d'aucun plan de ces camps. D'autre part, l'image Ikonos permet de localiser et d'évaluer les ressources naturelles qui environnent le camp à plus ou moins grande distance : couvert forestier, bas-fonds cultivables, arbres isolés. Cette information doit aider le Hcr à prendre les décisions afin de réduire au maximum les impacts environnementaux : programmes de fourniture de foyers améliorés, d'aménagement de bas-fonds ou de plantation forestière. Le Hcr a perçu cette opportunité puisque, dès à présent, il commande des images sur les nouveaux camps qui viennent d'être installés au nord de Kissidougou, de même qu'il en acquiert pour d'autres situations (Népal, Kenya). Ainsi, pour les besoins opérationnels du Hcr, la photo-interprétation de ces images s'avère être un moyen fiable et facile à mettre en œuvre, de par l'intégration directe de l'image sous le format GeoTiff dans un système d'information géographique (ici MapInfo).

Du point de vue méthodologique, le traitement automatique ou interactif de l'imagerie à très haute

résolution va, toutefois, requérir de nouvelles approches fondées à la fois sur la radiométrie et sur la forme des objets. Ces approches restent à développer sur la base d'algorithmes disponibles mais qui nécessitent d'être adaptés et assemblés. La cartographie à partir de cette imagerie engendre également des difficultés dans la généralisation cartographique pour regrouper un ensemble d'objets individualisés (points) en une zone (classe thématique). C'est pourquoi des méthodes de densitométrie (évaluation de la densité d'objets individualisés par unité de surface) seraient intéressantes à appliquer dans ce cas.

Au-delà de ces méthodes de cartographie s'ouvre enfin l'étude de l'organisation des paysages, et plus généralement l'écologie quantitative (TURNER *et al.*, 2001). En effet, les travaux menés sur des images Spot ou Landsat sont restés limités, du fait de la faible résolution spatiale de ces capteurs (IMBERNON, BRANTHOMME, 2001). Avec les images à très haute résolution, ces méthodes développées il y a plus de dix ans, pour analyser et quantifier l'organisation des paysages et les processus spatiaux, deviennent à présent applicables.

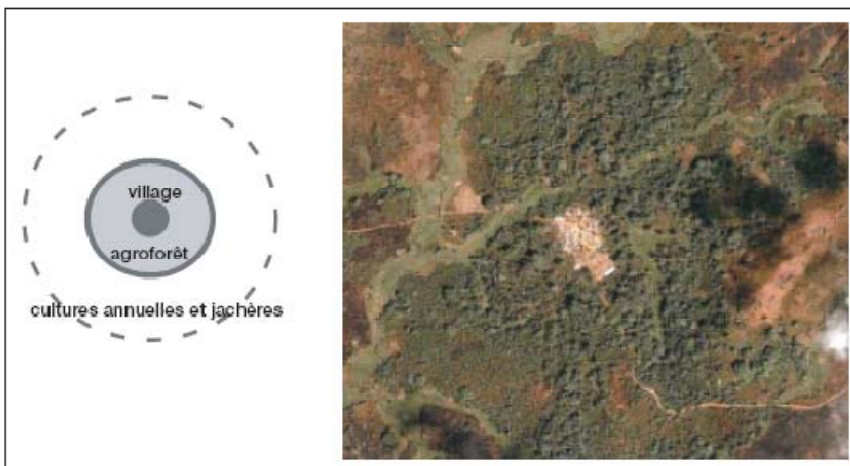


Figure 10.
Organisation du paysage en auréole autour des villages traditionnels.
Landscape organised into rings around traditional villages.

Références bibliographiques

CATANZANO T., IMBERNON J., 2001. Détection d'objets sur des images satellitaires à très haute résolution. Soumis à International Journal of Remote Sensing.

DELOIRME N., 1998. Aménagement forestier en Guinée. Étude de cas. Montpellier, France, Cirad, 180 p.

DEVEY M., 1997. La Guinée. Paris, France, Karthala.

FAIRHEAD J., LEACH M., 1996. Misreading the african landscape. Society and ecology in a forest-savanna mosaic. Cambridge University press, Royaume-Uni, 354 p.

FRANKLIN S. E., WULDER M. A., GERYLO G. R., 2001. Texture analysis of Ikonos panchromatic data for Douglas-fir forest age class separability in British Columbia. International Journal of Remote Sensing, 22 (13) : 2627-2632.

IMBERNON J., BRANTHOMME A., 2001. Characterization of landscape patterns of deforestation in tropical rain forests. International Journal of Remote Sensing, 22 (9) : 1753-1766.

TURNER M. G., GARDNER R. H., O'NEILL R. V., 2001. Landscape Ecology in Theory and Practice. Pattern and Process. New York, États-Unis, Springer-Verlag, XII, 404 p.

Synopsis

IKONOS IMAGERY AND ENVIRONMENTAL STUDIES: AN HCR REFUGEE CAMP IN THE GUINEAN FOREST

Jacques IMBERNON

The environmental impact of refugee populations in Guinean forest areas was measured by remote sensing at all spatial scales, during a CIRAD-HCR project. A very high resolution Ikonos satellite image of the area surrounding the Katkama refugee camp was used to evaluate its natural resources and environmental risks.

Using the Ikonos image

This high resolution image offers a new, more "human" view of the landscape, which helps to map habitat in fine detail (villages and camps) as well as secondary forest, agroforest, traditional palm plantations and access to roads and moist hollows where cultivation is possible.

Photo-interpretation of the image shows environmental encroachment by the refugee camp equivalent to that of Guinean villages and hamlets. Numerous moist hollows suitable for cultivation (178) are also apparent, as well as the relatively low forest cover (secondary forest and agroforest covering 12 % of the total area). Even individual objects, such as the oil palm *Elaeis guineensis*, are identifiable in the image.

Spatial analysis of concentric areas

A spatial analysis of concentric areas equidistant around the camp (buffers) was then carried out to calculate statistics for each type of object according to its distance from the camp. Results show the low density of forests and oil palms immediately around the camp, and the high agricultural potential of moist hollows less than 500 m away. The analysis thus shows that the choice of Katkama camp's location minimises risks of environmental damage and ensures ready access to water and moist hollows to grow crops.

Analysis of the entire image

Finally, an analysis of the image as a whole shows that tree cover in the area is patchy. Agroforest forms rings around the villages and the density of oil palms varies between annual croplands, agroforest, secondary forests and the periphery of moist hollows. This study demonstrates the valuable technical opportunities offered by very high resolution imagery. The technique removes the usual problems found with aerial photographs or earth observation imagery from Landsat or Spot satellites, since it combines a high level of discrimination between individual objects making up a landscape with a capacity for easy, direct incorporation into geographic information systems.

2.4 Communication et valorisation

2.4.1 Cédéroms

La déforestation vue par les satellites – projet Alternatives to Slash and Burn

Le cédérom multimédia «. Projet de recherche Cirad-Icraf : l'agriculture sur brûlis en région tropicale humide» présente la déforestation vue par satellite en Amazonie, en Afrique centrale et en Asie du Sud-Est. La problématique environnementale liée à l'agriculture sur brûlis et les techniques d'observation satellitaires sont décrites. Les analyses et les résultats obtenus sont ensuite illustrés par des images et des graphiques. Vous pouvez simuler vous-même la déforestation selon les hypothèses de votre choix et sur plus ou moins long terme.

mettre une copie de la jaquette....

Figure 1. Cd-Rom de la déforestation vue par les satellites (projet ASB).

Base de données Corine Land Cover du projet Sherpa en El Salvador

Ce Cd-Rom, élaboré dans le cadre du projet Sherpa, contient la base de données Corine Land Cover sur l'ensemble du territoire d'El Salvador et sur le bassin versant transfrontalier du rio Lempa, à l'échelle 1/50 000.

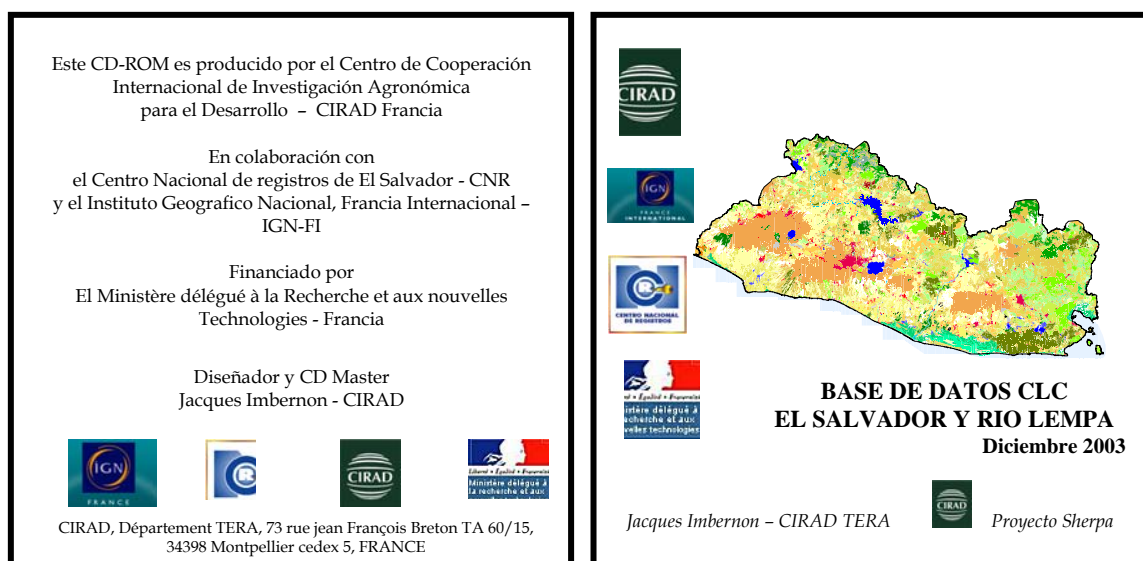


Figure 2. Cd-Rom de la base de données CLC au Salvador.

Système d'information du projet Prodesis pour la région du Chiapas (Mexique)

Ce Cd-Rom comporte une base de données spatiales (vectorielle et raster) sur la région de la « Selva Lacandona » dans la région du Chiapas au Mexique, ainsi qu'une interface « utilisateur » orientée sur deux applications :

- la gestion de « services environnementaux » ,
- l'appui aux producteurs de café organique, en particulier dans le processus de certification et de contrôle interne.



Figure 3. Cd-Rom du système d'information pour le café organique et le paiement pour services environnementaux au Chiapas – Mexique (projet Prodesis).

2.4.2 Sites web

Site Web du projet Hcr

<http://guinee-hcr.cirad.fr/>

Ce site Web est le site du projet "Procédures de diagnostic et de suivi environnemental dans les zones d'accueil de réfugiés" que j'ai coordonné pour le compte du Haut Commissariat aux réfugiés.

Il présente le projet, ses objectifs, les méthodes utilisées, le contexte de la Guinée forestière où il s'est déroulé, les principaux résultats obtenus et donne un aperçu de la base de données constituées pour le projet.



Figure 4. Page d'accueil du site Web du projet « Environnement et populations réfugiées » (projet UNHCR)

Sites Web du projet Sinrem

<http://inco-sinrem.cirad.fr/>

Ce site web est le site du projet Sinrem que j'ai coordonné pour le compte du 6^{ème} PCRD de la Commission Européenne. Il décrit la structure du projet, ses objectifs, les différentes activités du projet (« Work Packages ») et donne un accès restreint

aux partenaires du projet pour échanger tous les documents produits dans le cadre du projet.



Figure 5. Page d'accueil du site Web du projet Sinrem en Amérique Centrale

<http://www.aguasinfronteras.net/>

Ce site a été développé par le projet SINREM pour le compte de la 'Comision Trinacional del Plan Trifinio'. Il donne accès à un grand nombre de données et de cartes sur la zone du projet. Le système est actuellement maintenu par le 'Sistema de Integracion CentroAmericana', une organisation régionale qui promeut l'intégration des sept pays d'Amérique Centrale.



Figure 6. Page d'accueil du site Web « Aguas sin fronteras » développé par le projet Sinrem en Amérique Centrale.

Site Web du projet Lupis

<http://lupis.cirad.fr/>

Ce site est un portail web de données développé pour le projet Lupis, un projet européen du 6^{ème} PCRDT, dont j'ai coordonné l'activité (Work Package « data portal »). Ce portail donne accès à des données globales et locales (les « case studies »), quelles soient statistiques, spatiales ou textuelles (les politiques publiques). Il comporte de nombreuses interfaces interactives: « Webmapping », graphiques animés « à la volée », wiki. Et les développements ont été réalisés avec des bibliothèques « open source » seulement et assemblés selon une architecture modulaire qui permet de modifier un composant sans altérer les autres. Cette architecture a permis aussi de transférer le portail chez un des partenaires, l'Institut des Régions Arides (IRA) en Tunisie, dans un contexte et avec des besoins différents.

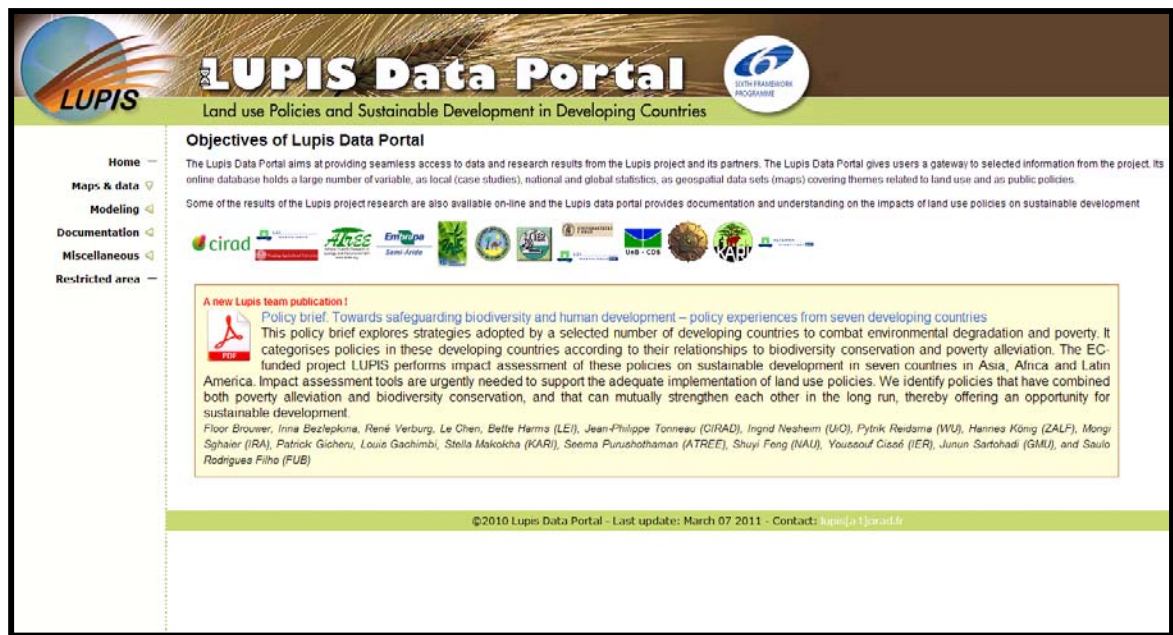


Figure 7. Page d'accueil du site portail Web du projet Lupis.

2.4.3 Brevet

Le logiciel Adoc a breveté en 2002. Il a été développé dans le cadre d'un projet avec le Haut Commissariat aux Réfugiés (UN-HCR) pour détecter et compter automatiquement les abris de réfugiés dans les camps de réfugiés sur des images satellitaires à très haute résolution.

La méthode utilisée est le « matching », qui consiste à comparer un modèle d'objet aux objets présents sur l'ensemble de l'image. Le logiciel utilise la bibliothèque « Open Source Computer Vision » (OpenCV) développée par Intel. Ces bibliothèques d'Intel sont utilisées avec une interface Windows grâce à des convertisseurs d'images en format DIB (format d'affichage Windows MFC) et des fonctions écrites en C\C++.

Ce logiciel est composé d'une chaîne de traitement en trois parties :

- des traitements de bas niveau, dont le rôle est de rehausser les caractéristiques propres de l'ensemble des objets que l'on souhaite distinguer. Ces traitements utilisent des opérateurs de morphologie mathématique.
- une comparaison d'objets par rapport à un objet de référence prédéfini par l'utilisateur. L'algorithme de comparaison (matching) s'applique sur trois critères : la forme, la radiométrie moyenne et l'écart-type de la radiométrie.
- Des algorithmes de haut niveau qui utilisent des critères contextuels comme le voisinage.

Cette chaîne de traitements s'applique conjointement sur les différents canaux d'une image. De plus l'utilisateur a la possibilité de déterminer plusieurs modèles d'objets (références) pour le 'matching'.

Le résultat de la détection est une image de vraisemblance des objets où à chaque objet détecté est affecté une probabilité. L'utilisateur a ensuite le choix de faire varier la probabilité de vraisemblance et seuls les objets dont la probabilité est supérieure à ce seuil sont conservés.



Figure 8. Logiciel Adoc de reconnaissance automatique de formes sur des images satellitaires.